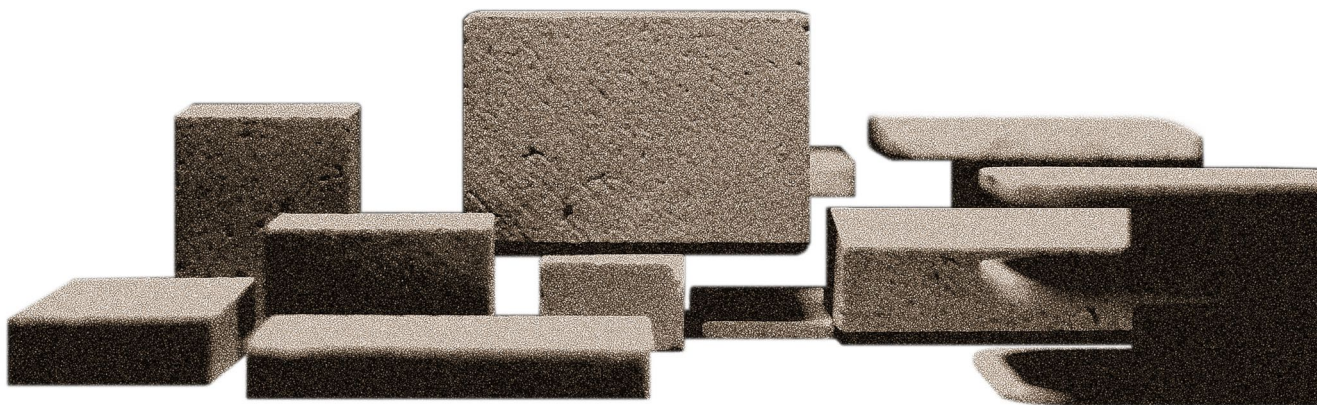


ESTUDIO EXPERIMENTAL DE GEOPOLÍMEROS DE ARCILLAS

en función de la resistencia mecánica



JUAN CARLOS CALDERÓN PEÑAFIEL

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE GEOPOLÍMEROS DE ARCILLAS

en función de la resistencia mecánica

Autor:

Juan Carlos Calderón Peñafiel

Directores:

Profesor Jaume Avellaneda

Profesor Joan Ramon Rosell

Programa de doctorado de Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo

Departamento de Tecnología de la Arquitectura

Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona - Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, abril de 2019

Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya

a Sebastián y Linda

*"Al elaborar un ideal podemos dar por supuesto lo que deseamos,
pero es necesario evitar las imposibilidades." (Aristóteles)*

AGRADECIMIENTOS

Quiero reconocer y agradecer el apoyo del Gobierno de Ecuador mediante una beca de estudios otorgada por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENESCYT) y del Instituto de Fomento al Talento Humano (IFTH).

Agradezco a mis directores: al Profesor Jaume Avellaneda que me ha brindado su apoyo y ha dirigido el desarrollo de la tesis y al Profesor Joan Ramon Rosell, que me ha guiado en el proceso experimental y me ha abierto las puertas del *Laboratori de Materials*. Gracias por el soporte y la confianza.

Quiero agradecer por sus aportes especiales y observaciones a: Antonia Navarro, Mariana Palumbo, Ana Torres, Ana Lacasta, Marc Tous, Cristina Díez, Juan Diego Martín, Joan Formosa, Sussana Pérez, Carles Serrat, Dieter Boer, Xenia Armengol, Linda Rens, Servando Chinchon, Josep Claramunt Blanes, Felipe Pich-Aguilera y a todas las personas que han contribuido en esta investigación.

Agradezco a la *L'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona* (ETSAB), especialmente a: María Luz Soro, Encarnación Bayona, María Teresa Salceda, y a todo el personal de la biblioteca.

Agradezco a la *Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona* (EPSEB) y al *Laboratori de Materials*, especialmente a: Judith Ramírez, Montserrat Bosch, Laia Haurie, Joaquín Montón, Inmaculada Rodríguez, Xavier Casanova, a las personas que han colaborado en esta tesis y he mencionado antes, y a todo el personal de la biblioteca.

Agradezco a quienes fueron en algún momento mis compañeros de despacho: Rossella Putzolu, Fabio Gatti, María Ferrandiz, Belén González, Vanya Gasola, Marta Rosell, Sara Bedini, Oscar Lopez, David Osmar. Y a los becarios: Patri, Oriol, Jaume, Albert, Gabor, Christopher, Ruben y demás.

Gracias a quienes han formado parte de mis días en el laboratorio. Los voy a extrañar cuando escuche una máquina de café... y sobre todo los jueves.

Finalmente agradezco a mi familia y amigos por su apoyo incondicional y de manera especial, agradezco a la ciudad de Barcelona y a su gente. Siempre estarán en mi corazón.

ABSTRACT

Considering that architecture and construction play an active part in the current global warming problems, there is a need to develop resistant construction materials with coherent environmental characteristics. The main objective of this research was to test the principles of geopolymerization in the manufacture of experimental polymerized-clay bricks and to improve the mechanical characteristics of the bricks, while maintaining low levels of embodied energy. The research included the state of the art of clays, geopolymers and an experimental study that included the design, manufacturing, characterization and analysis of raw materials and experimental bricks based on clay. The optimized polymerized-clay bricks showed compressive strengths between 20-30MPa with 80-90% less environmental impact than common fired bricks. The results showed that the principles of geopolymerization can be applied in the manufacture of natural clay materials with success, increasing mechanical performance and maintaining low levels of embodied energy.

KEYWORDS:

geopolymers, polymerized-clay bricks, clay, clay bricks, clay materials, compressive strength, embodied environmental impact.

RESUMEN

Considerando que la arquitectura y la construcción forman parte activa en la problemática medioambiental global, existe la necesidad de desarrollar materiales de construcción resistentes con características ambientales coherentes. El objetivo principal de esta investigación fue probar los principios de geopolimerización en la fabricación de bloques experimentales de arcilla natural para dotarlos de mejores características mecánicas, manteniendo niveles bajos de energía incorporada. La investigación incluyó el estado del arte de las arcillas, geopolímeros y un estudio experimental que abarcó el diseño, fabricación, caracterización y análisis de materiales precursores y bloques experimentales a base de arcilla. Los bloques optimizados mostraron resistencias a compresión entre 20-30MPa con 80-90% menos impacto ambiental que los ladrillos de arcilla cocida. Los resultados evidenciaron que los principios de geopolimerización pueden ser aplicados en la fabricación de materiales de arcilla natural con éxito, incrementando el desempeño mecánico y manteniendo niveles bajos de energía incorporada.

PALABRAS CLAVE:

geopolímeros, bloques de arcilla polimerizada, arcilla, ladrillos de arcilla, materiales de arcilla, resistencia a compresión, impacto ambiental incorporado.

Abreviaturas y símbolos

(K)	caolinita	Mg	magnesio
Å	Armstrong	mg	miligramos
Ac	área transversal	MgO	óxido de magnesio
ACV	análisis de ciclo de vida	mL	mililitro
ADL	análisis de distribución de tamaños de partícula mediante difracción láser	MMD	diámetro mediano de masa
AIPEA	<i>Association Internationale Pour l'Etude Des Argile</i>	Mn	manganeso
Al	aluminio	MnO	óxido de manganeso
Al-O	enlaces aluminio – oxígeno	MOE	módulo de elasticidad dinámico, módulo de Young
Al ₂ O ₃	óxido de aluminio	MOH	hidróxido metálico
ATG	análisis termogravimétrico	MPa	mega Pascales
Ba	bario	N	Newton
BTC	bloque de tierra comprimido	Na	sodio
Ca	calcio	Na ₂ CO ₃	carbonato de sodio
CaO	óxido de calcio	Na ₂ O	óxido de sodio
CH ₄	metano	Na ₂ SiO ₃	silicato de sodio
Chl	clorita	NaHCO ₃	bicarbonato de sodio
Cl	cloro	NH ₄ ⁺	amonio
CMS	Clay Minerals Society	nm	nanómetro
CO ₂	dióxido de carbono	O	oxígeno
Cr	cromo	°C	grados Celsius
CsOH	hidróxido de cesio	OH	ion hidróxido, OH ⁻
d	dimensión, distancia	P ₂ O ₅	óxido de fósforo
Di	doble	pH	potencial de hidrógeno
DOE	diseño de experimentos (<i>desing of experiment</i>)	Plg	plagioclasa
DRX	análisis por difracción de rayos X	Q	cuarzo
DTG	derivada termogravimétrica	Quincha	tejido o trama de junco con que se afianza un techo o una pared de paja, totora o caña.
EFC	Earth Friendly Concrete	RbOH	hidróxido de rubidio
F	flúor	RILEM	<i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i>
Fe	hierro	ReCiPe	método para la evaluación de impacto ambiental
Fe ₂ O ₃	óxido de hierro	rpm	revoluciones por minuto
Fk	feldespato alcalino potásico	S	azufre
FRX	análisis por fluorescencia de rayos X	SAET	ensayo de erosión acelerada <i>Swinburne</i>
fc	resistencia a compresión	SEM	microscopía electrónica de barrido
fcf	resistencia a flexión	Si	silicio
GPa	giga Pascal	Si-O	enlaces silicio – oxígeno
Gt	giga tonelada	Sialato	silicio - oxo - aluminato
H	hidrógeno	SiH ₄	silano
H ₂ SO ₄	ácido sulfúrico	SiO ₄	silicato (SiO ₄) ⁴⁻
HCl	ácido clorhídrico	SSA	superficie específica
Hg	mercurio	t	tonelada
Hm	hematita	TiO ₂	óxido de titanio
I	illita	Tipo O	hoja octaédrica (Tipo O)
ICTJA-CSIC	<i>Institute of Earth Sciences Jaume Almera of the Spanish Scientific Research Council</i>	Tipo T	hoja tetraédrica (Tipo T)
K	potasio	Tipo T-O	hoja mixta (Tipo T-O)
K ₂ CO ₃	silicato de potasio	Tipo T-O-T	hoja mixta (Tipo T-O-T)
K ₂ O	óxido de potasio	Tri	triple
Kg	kilogramo	U	uranio
L	litro	Vol	volumen
l	longitud, distancia	Zn	zinc
Li	litio	λ	conductividad térmica <i>Lambda</i> W/mK
M	molar, molaridad, concentración molar	μm	micrómetro o micra
Me	metal alcalino		

Índice

Agradecimientos.	VI
Resumen (abstract)	VII
Abreviaturas y símbolos	VIII
Índice	IX
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	
1.1 Planteamiento del problema	03
1.2 Delimitación del ámbito de estudio	03
1.3 Hipótesis	06
1.4 Objetivos	06
1.5 Metodología	07
1.6 Estructura de la investigación	07
CAPÍTULO 2	
ESTADO DEL ARTE	
2.1 Las arcillas: nanomateriales naturales	11
2.1.1 Antecedentes	11
2.1.2 Definición	13
2.1.3 Genealogía de las arcillas	14
2.1.4 La estructura de las arcillas	17
2.1.4.1 Hoja tetraédrica (Tipo T)	17
2.1.4.2 Hoja Octaédrica (Tipo O)	18
2.1.4.3 Hoja mixta (Tipo T-O)	19
2.1.4.4 Hoja mixta (Tipo T-O-T)	19
2.1.4.5 Disposición atómica	20
2.1.4.6 Otros minerales	20
2.1.4.7 Poros	21
2.1.5 Clasificación de las arcillas	21
2.1.5.1 Grupo 1:1	22
Los caolines	22
La halloysita	22
2.1.5.2 Grupo 2:1	23
Las esmectitas	23
Las micas	24
Illitas	24
Cloritas	25
Vermiculitas	25
Palygorskita (atapulgita): sepiolita	26
Minerales de capa mixta	26
2.1.6 Propiedades de la arcilla	26
2.1.6.1 Interacción agua - arcilla	26
2.1.6.2 Efectos de la temperatura	27

2.2 Geopolimerización	29
2.2.1 Antecedentes	29
2.2.2 Definición general	31
2.2.3 Reseña histórica	33
2.2.4 Terminología y estructura	36
2.2.5 Fuente de aluminosilicatos	37
2.2.5.1 Productos y subproductos industriales	38
2.2.5.2 Aluminosilicatos Naturales	39
2.2.6 Activadores alcalinos	41
2.2.6.1 Hidróxido de Sodio (NaOH)	42
2.2.6.2 Hidróxido de Potasio (KOH)	42
2.2.6.3 Soluciones de silicatos alcalinos	43
2.2.6.4 Silicato de sodio (Na_2SiO_3)	43
2.2.6.5 Otros activadores alcalinos	44
2.2.7 El proceso de síntesis de geopolímeros	44
2.2.7.1 Primera etapa. (a) Disolución	46
2.2.7.2 Segunda etapa. (b) Polimerización	46
2.2.7.3 Tercera Etapa. (c) Cristalización	47
2.2.8 Otros factores implicados	47
2.2.8.1 El agua	48
2.2.8.2 Los materiales de relleno	48
2.2.8.3 El proceso de curado	48
2.2.9 Impacto medioambiental	48
2.2.10 Interés científico en geopolímeros	50
2.2.11 Uso de geopolímeros en la construcción	53
2.2.11.1 Uso de cementos alcalinos	53
2.2.11.2 Uso de geopolímeros	55
2.3 Geopolímeros a base de arcillas	59
2.3.1 Antecedentes	59
2.3.2 Características poliméricas de los aluminosilicatos	61
2.3.2.1 Características poliméricas del silicio	61
2.3.2.2 Características poliméricas del aluminio	62
2.3.3 Aluminosilicatos laminares: arcillas	63
2.3.3.1 Estructuras de lámina	63
2.3.4 Reactividad de las arcillas	65
2.3.4.1 Efectos por tratamiento térmico	65
2.3.4.2 Alternativas de tratamiento químico	66
2.3.4.3 Interacciones orgánicas	66
2.3.4.4 Tratamiento por trituración mecánica	67
2.3.5 Disolución de aluminosilicatos de arcilla	67
2.3.6 Investigaciones destacadas	69
2.3.6.1 Uso de caolinita no tratada térmicamente	69
2.3.6.2 Influencia de la concentración de Na y K	70
2.3.6.3 Efecto de la activación mecánica y el proceso de curado	71
2.3.6.4 Caracterización de caolinita activada	72
CAPÍTULO 3	
ESTUDIO EXPERIMENTAL DE GEOPOLÍMEROS DE ARCILLAS EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA	
3.1 Antecedentes	79
3.2 Objetivos de la campaña experimental	80
MÉTODOS Y MATERIALES	80
3.3 Consideraciones generales	80

3.4 Elección de materiales de partida	83
3.4.1 Arena	83
3.4.2 Agua (H ₂ O)	84
3.4.3 Activadores alcalinos	84
Hidróxido de sodio (NaOH)	84
Hidróxido de potasio (KOH)	84
Silicato de sodio (Na ₂ SiO ₃)	84
3.4.4 Otros aditivos para pruebas piloto	84
Óxido de Calcio	84
Plastificantes	84
3.4.5 Arcillas	85
3.5 Caracterización de las arcillas	85
3.5.1 Caracterización de arcilla Tipo A	86
3.5.1.1 Determinación del límite líquido y del límite plástico de arcilla Tipo A	86
3.5.1.2 Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo A	86
3.5.1.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo A	86
3.5.1.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo A	88
3.5.1.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo A	89
3.5.1.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo A	89
3.5.1.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo A	90
3.5.2 Caracterización de arcilla Tipo B	92
3.5.2.1 Determinación del límite líquido y del límite plástico de arcilla Tipo B	92
3.5.2.2 Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo B	92
3.5.2.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo B	92
3.5.2.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo B	94
3.5.2.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo B	95
3.5.2.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo B	95
3.5.2.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo B	96
3.5.3 Caracterización de arcilla Tipo C	98
3.5.3.1 Determinación del límite líquido y del límite plástico de arcilla Tipo C	98
3.5.3.2 Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo C	98
3.5.3.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo C	98
3.5.3.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo C	100
3.5.3.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo C	101
3.5.3.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo C	101
3.5.3.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo C	102
3.5.4 Caracterización de arcilla Tipo D	104
3.5.4.1 Determinación del límite líquido y del límite plástico de arcilla Tipo D	104
3.5.4.2 Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo D	104
3.5.4.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo D	104
3.5.4.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo D	106
3.5.4.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo D	107
3.5.4.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo D	107
3.5.4.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo D	108
3.5.5 Comparación de los diferentes tipos de arcillas	110
3.6 Diseño de experimentos	111
3.6.1 Campaña experimental A (GEO-A)	112
3.6.2 Campaña experimental B (GEO-B)	113
3.6.3 Campaña experimental C (GEO-C)	114
3.6.4 Campaña experimental D (GEO-D)	118
3.6.5 Campaña experimental E (GEO-E)	119
3.6.6 Campaña experimental F (GEO-F)	121
3.6.7 Pruebas piloto	122
RESULTADOS	127
3.7 Resultados de los análisis de resistencia mecánica	127
3.7.1 Resistencia a compresión y flexión: Campaña experimental GEO-A	128

3.7.2 Resistencia a compresión y flexión: Campaña experimental GEO-B	129
3.7.3 Resistencia a compresión y flexión: Campaña experimental GEO-C	129
3.7.4 Resistencia a compresión y flexión: Campaña experimental GEO-D	129
3.7.5 Resistencia a compresión y flexión: Campaña experimental GEO-E	130
3.7.6 Resistencia a compresión y flexión: Ensayos complementarios	131
3.8 Análisis de la influencia de variables en la resistencia a compresión en polímeros a base de arcilla Tipo A	134
3.8.1 Análisis factorial - Campaña GEO-A	134
3.8.2 Análisis factorial - Campaña GEO-B	137
3.8.3 Influencia de la arena	140
3.8.4 Influencia del agua	141
3.8.5 Influencia de la concentración y tipo de activador alcalino	142
3.8.6 Influencia de la adición de silicato de sodio	143
3.8.7 Influencia de la temperatura y tiempo de exposición	144
3.8.8 Influencia de la adición de cal	145
3.8.9 Influencia de otros aditivos	146
3.8.10 Formulaciones óptimas en función a la resistencia a compresión	146
3.9 Análisis del comportamiento de diferentes arcillas ante geo-polimerización alcalina	148
3.10 Análisis complementarios de geo-polímeros a base de arcilla Tipo A	154
3.10.1 Composición: Análisis por difracción de rayos X (DRX)	154
3.10.2 Análisis termogravimétrico (ATG)	156
3.10.3 Estructura: Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM)	157
3.10.4 Estructura porosa - Porosimetría por inyección de mercurio	158
3.10.5 Estructura porosa - Porosidad (método convencional)	159
3.10.6 Absorción de agua por capilaridad	159
3.10.7 Permeabilidad al vapor de agua	160
3.10.8 Módulo de Young	161
3.10.9 Durabilidad	161
3.10.10 Lixiviación	162
3.10.11 Comportamiento térmico	163
3.11 Análisis del impacto ambiental	163
3.11.1 Análisis del comportamiento ambiental de los bloques de arcilla polimerizada	164
3.11.2 Comparación con productos de construcción similares	166
CAPÍTULO 4	
CONCLUSIONES	
4. Conclusiones	169
4.1 Conclusiones del estudio experimental de geopolímeros de arcillas en función a su resistencia mecánica	170
Sobre la resistencia mecánica	170
Sobre el rol de las variables que intervienen en la fabricación de bloques de arcilla polimerizada	170
Sobre la optimización de las características mecánicas de polímeros de arcilla Tipo A	171
Sobre el comportamiento de diferentes arcillas ante activación alcalina común	171
Sobre los análisis complementarios de polímeros a base de arcilla Tipo A	172
Sobre el análisis del impacto ambiental	173
4.2 Alcance de la investigación	173
4.3 Futuras líneas de investigación	174
TABLA DE NOMENCLATURAS Y CÓDIGOS DE MEZCLAS	176
LISTA DE FIGURAS, IMÁGENES Y CRÉDITOS	177
BIBLIOGRAFÍA	185

ANEXOS		195
Anexo 1.0 "Compressive strength and embodied environmental impact of experimental polymerized-clay bricks"		197
Anexo 2.0 "Materiales de arcilla geo-polimerizada: Tecnologías para la arquitectura del futuro"		215
Anexo 3.0 "La tierra: un material compuesto"		220
Anexos de la campaña experimental		
Anexo 4.0	Descripción de análisis y ensayos	238
Anexo 5.0	Procedimientos experimentales y equipos	247
Anexo 6.6.1.1	Determinación del límite líquido y determinación del límite plástico de arcilla Tipo A	250
Anexo 6.6.1.2	Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo A	251
Anexo 6.6.1.3	Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo A	252
Anexo 6.6.1.6	Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo A	256
Anexo 6.6.1.7	Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo A	259
Anexo 6.6.2.1	Determinación del límite líquido y determinación del límite plástico de arcilla Tipo B	263
Anexo 6.6.2.2	Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo B	264
Anexo 6.6.2.3	Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo B	265
Anexo 6.6.2.6	Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo B	269
Anexo 6.6.2.7	Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo B	272
Anexo 6.6.3.1	Determinación del límite líquido y determinación del límite plástico de arcilla Tipo C	274
Anexo 6.6.3.2	Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo C	275
Anexo 6.6.3.3	Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo C	276
Anexo 6.6.3.6	Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo C	280
Anexo 6.6.3.7	Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo C	283
Anexo 6.6.4.1	Determinación del límite líquido y determinación del límite plástico arcilla Tipo D	285
Anexo 6.6.4.2	Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo D	286
Anexo 6.6.4.3	Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo D	287
Anexo 6.6.4.6	Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo D	291
Anexo 6.6.4.7	Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo D	294
Anexo 6.7.1	Diseño de experimentos	296
Anexo 6.9.1	Resistencia a la compresión y flexión: Campaña experimental A (GEO-A)	310
Anexo 6.9.2	Resistencia a la compresión y flexión: Campaña experimental B (GEO-B)	312
Anexo 6.9.3	Resistencia a la compresión y flexión: Campaña experimental C (GEO-C)	313
Anexo 6.9.4	Resistencia a la compresión y flexión: Campaña experimental D (GEO-D)	316
Anexo 6.9.5	Resistencia a la compresión y flexión: Campaña experimental E (GEO-E)	317
Anexo 6.9.6	Resistencia a la compresión y flexión: Ensayos complementarios	319
Anexo 6.12.1	Análisis DRX de geo-polímeros a base de arcilla	330
Anexo 6.12.2	Análisis termogravimétrico ATG de geo-polímeros a base de arcilla	339
Anexo 6.12.3	Análisis SEM de geo-polímeros a base de arcilla	344
Anexo 6.12.4	Análisis de porosimetría por inyección de mercurio de geo-polímeros a base de arcilla	360
Anexo 6.12.6	Determinación de la absorción de agua por capilaridad de geo-polímeros a base de arcilla	364
Anexo 6.12.7	Permeabilidad al vapor de agua de geo-polímeros a base de arcilla	370
Anexo 6.12.8	Determinación del módulo de elasticidad dinámico MOE de geo-polímeros a base de arcilla	382

Introducción

CAPÍTULO 1



Fig. 1.1 "Los avances sobre el conocimiento físico de la composición de la materia podrán alterar la capacidad resistente de nuestros materiales y originar nuevas tipologías estructurales". (créditos en apartado: Lista de figuras, imágenes y créditos)

“Muchos de los enigmas sobre la composición de la materia que se han ido desvelando, han acabado ejerciendo influencia en la Arquitectura de un modo u otro. Y consecuentemente, en nuestros hábitos y en las posibilidades de uso del espacio. Como ejemplo directo, se puede señalar la aparición de la luz eléctrica. “Solamente” este fenómeno que combina el conocimiento de la electricidad y de la combustión estable, ha alterado toda construcción arquitectónica, incluyendo el aspecto de las ciudades. Así, la Arquitectura no es ajena al conocimiento de las cualidades microscópicas de la materia. Con toda seguridad los avances sobre el conocimiento físico de la composición de la materia, como por ejemplo la nanotecnología, podrán alterar la capacidad resistente de nuestros materiales y originar nuevos tipos de tipologías estructurales.

Vaya aquí este primer tributo a la pequeña dimensión de la materia”.

(Trias de Bes J. (2013). Arquitecturas Matéricas, Tesis Doctoral. Departament De Composició Arquitectónica. Universitat Politècnica De Catalunya. p.71)

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen dos recursos fundamentales para la producción de arquitectura: por un lado la luz, entendida como la producción conceptual y compositiva o como el medio de interpretación de la materia a causa de fenómenos físicos, y por otro lado la materia, entendida como el recurso disponible para la materialización del proyecto arquitectónico.

En el contexto de los materiales, los avances en la ciencia y la tecnología con los que se cerró el siglo XX han propiciado logros notables influenciando sustancialmente las prácticas constructivas. Pero más allá del hormigón y el acero, materiales como el grafeno o los nanomateriales inauguran plataformas que sobrepasan los antiguos paradigmas en la arquitectura. Empero, la construcción y los modelos de producción y uso de los materiales convencionales continúan deteriorando el

medioambiente y comprometiendo el futuro del planeta. La motivación de esta investigación parte de esta anomalía que justifica la exploración de alternativas a materiales de construcción de alta energía incorporada, en este caso, mediante la utilización de arcillas naturales para la fabricación de materiales de construcción por medio de tecnologías análogas a la geopolimerización.

1.2 DELIMITACIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO

El uso de materiales ancestrales tales como arcilla, piedra, paja, madera no procesada, etc., fue común en la práctica constructiva de pueblos antiguos durante milenios, pese a ello, desde una perspectiva moderna algunos son considerados materiales susceptibles a problemas asociados con disponibilidad, durabilidad y resistencia. A partir de la revolución industrial la transformación

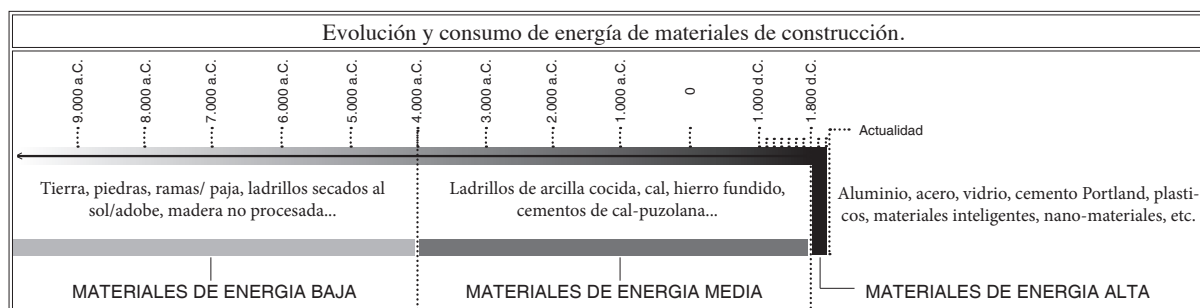


Fig. 1.2. Línea del tiempo y consumo de energía de materiales de construcción.

de las prácticas de construcción han ocasionado un deterioro medioambiental gradual. Hoy las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático derivado representan un problema que exige nuevas directrices en los modelos constructivos.

La energía es la herramienta principal en la fabricación de materiales modernos. La industria de la construcción transforma materiales de estado natural en productos y materiales de construcción procesados implicando comúnmente un costo energético y ambiental importante. Podemos citar como ejemplos la tradicional cocción de ladrillos de arcilla, la producción de cal, la obtención de puzolanas, el proceso de obtención del vidrio y el cemento Portland que, conjuntamente con el acero, transformaron la construcción provocando que la actividad generada en torno a la arquitectura represente un problema medioambiental (Fig.1.2).

Hoy la construcción consume gran parte de recursos naturales y es responsable del 33% de las emisiones de gases de efecto invernadero [1]. Los edificios ocupan a lo largo de su ciclo de vida más del 40% de toda la energía que se produce [2]. Para reducir la energía incorporada de los nuevos edificios es importante, no solo reducir las necesidades energéticas operativas sino también, prestar atención a la elección de los materiales de

construcción en la fase de diseño.

En la actualidad el hormigón a base de cemento Portland es el material más utilizado en el planeta con un consumo de 1m³ por persona al año [3]. Las principales materias primas que intervienen en la producción de cemento son: la piedra caliza (80%) y la arcilla (20%). Estos materiales se calcinan a 1450°C para producir clínker que luego es triturado y mezclado con aditivos. La producción de 1 tonelada de cemento Portland ordinario genera un total de 0,94 toneladas de CO₂ (prácticamente una tonelada de CO₂ por cada tonelada de cemento) [4]. El cemento Portland es el aglutinante dominante de la industria de la construcción con una producción anual que creció desde 0,594Gt en 1970 [5] a 4Gt en 2005 [6].

Por otro lado la tierra, con la arcilla como conglomerante principal, ha sido el material más utilizado a lo largo de la historia de la humanidad y uno de los materiales más amigables con el medioambiente, pero adolece de una imagen

1 Sinha, R., Lennartsson, M., & Frostell, B. (2016). *Environmental footprint assessment of building structures: A comparative study*. Building and Environment, 104, 162–171. p.162 <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.012> .

2 United Nations. (2009). *Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers*. 1–62. p. 3. <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.

3 Gartner, E. (2004). *Industrially interesting approaches to “low-CO2” cements*. Cement and Concrete Research, 34(9), 1489–1498. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021> .

4 Nazari, A., Sanjayan, J. G. (2017). *Handbook of Low Carbon Concrete*. Butterworth-Heinemann. p.195. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128045244>.

5 Taylor, M., Tam, C., & Gielen, D. (2006). *Energy Efficiency and CO 2 Emissions from the Global Cement Industry*. IEA-WBCSD Cement Energy Efficiency Industry Workshop, (September). p. Retrieved from http://www.iea.org/work/2006/cement/taylor_background.pdf.

6 USGS. (2018). *Mineral Industry Surveys - PLATINUM-GROUP METALS*, (June 2017). Retrieved from <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mis-201802-plati.pdf>.

deficiente debido a la baja resistencia que presenta en comparación con la piedra o los materiales procesados. Este ha sido el motivo principal de la búsqueda de un sinnúmero de estrategias de optimización de los materiales a base de arcilla. Entre los métodos de “estabilización” más populares están la adición de aditivos (sangre, orina, cal, cemento, puzolanas, etc.), la compactación del material (manual o mecánica) y el uso de energía. Este último recurso, conocido desde hace milenios, dota a los materiales de arcilla de características resistentes sobresalientes mediante procedimientos específicos de preparación y transformación por exposición a altas temperaturas (aproximadamente 1000°C).

La resistencia a la compresión a menudo se considera la característica mecánica más importante de los materiales de construcción [7], por tanto, al tomar en cuenta el impacto ambiental, el principal desafío ha sido y es el uso de la menor cantidad de energía para la obtención de materiales más resistentes. Los bloques de arcilla sin cocer alcanzan resistencias a la compresión que oscilan entre 0,39MPa para bloques sin estabilizar y 6,5MPa para bloques estabilizados con un 20% de cemento [8]. Estas cifras están muy por debajo de la resistencia estándar del hormigón a base de cemento Portland o ladrillos cerámicos de arcilla (igual o mayor a 20MPa).

En los últimos años, como resultado de la problemática ambiental, el estudio de mecanismos para la estabilización de la arcilla ha despertado el interés científico. En la actualidad la combinación de modernas técnicas de análisis permiten una mayor comprensión de la composición y estructura de la tierra y la arcilla. Estos avances han provocado el desarrollo de tecnologías que permiten optimizar los materiales de arcilla tomando en cuenta las características microscópicas mediante procesos

microbiológicos [9]; nanotecnología [10]; geopolimerización [11]; activación alcalina [12]; etc.; convirtiéndose en herramientas que han definido los nuevos horizontes en el desarrollo de estos materiales. De hecho, los minerales de arcilla empiezan a ser entendidos como “nanomateriales naturales” que pueden dispersarse como partículas de unidades de tamaño nanométrico para formar fases poliméricas formando nuevos materiales.

“Geopolimerización” es el término utilizado para hacer referencia a la reacción química que se produce al mezclar aluminosilicatos con activadores alcalinos concentrados (o menos frecuentemente con ácidos), comúnmente hidróxidos y/o silicatos alcalinos, con lo cual se obtiene una nueva red molecular polimérica formando materiales denominados “geopolímeros” [13], término acuñado por el científico Joseph Davidovits.

Los “geopolímeros” son una gran familia de materiales que en muchos casos presentan características sobresalientes en cuanto a resistencia mecánica, resistencia al fuego y resistencia a agentes corrosivos. Además varias investigaciones sobre impacto ambiental demuestran que los geopolímeros pueden ser una alternativa a materiales con gran cantidad de energía incorporada [14]. Los geopolímeros más

7 Aubert, J. E., Maillard, P., Morel, J. C., & Al Rafii, M. (2015). *Towards a simple compressive strength test for earth bricks?*. *Materials and Structures*, (APRIL). <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.4641.4242>.

8 Alam, I., Naseer, A., Shah, A. A. (2015). *Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas*. *Construction and Building Materials*, 77, 154–159. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046>.

9 Achal, V., Mukherjee, A., Kumari, D., & Zhang, Q. (2015). *Earth-Science Reviews Biomineralization for sustainable construction – A review of processes and applications*. *Earth Science Reviews*, 148, 1–17. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.008>.

10 F. Pacheco-Torgal, M. V. Diamanti, A. N. et. al. (2013). *Nanotechnology in eco-efficient construction*. (Woodhead Publishing Limited, Ed.).

11 Provis, J. L., van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. CRC Press, Woodhead Publishing, Great Abington, Cambridge, UK. <http://doi.org/10.1533/9781845696382>.

12 Pacheco-Torgal, F. (2015). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. United Kingdom: Woodhead Pub.

13 Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.

14 Nazari, A., Sanjayan, J. G. (2017). *Handbook of Low Carbon Concrete*. Butterworth-Heinemann. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128045244>. p.195.

estudiados hasta la fecha han sido fabricados a partir de cenizas volantes, escorias de alto horno, metacaolín y otras materias primas ricas en aluminosilicatos altamente reactivos.

La posibilidad de utilizar diferentes fuentes de aluminosilicatos en la fabricación de geopolímeros ha propiciado el estudio de materiales precursores* alternativos. En el caso de las arcillas generalmente se parte de un proceso previo de alteración térmica que amplifica las características reactivas naturales del material, tal como sucede con el metacaolín (caolín expuesto a más de 500°C). También se ha demostrado que los suelos puzolánicos tratados con soluciones alcalinas dan como resultado materiales similares a los geopolímeros a base de metacaolín, debido a las elevadas temperaturas a las que la materia prima fue expuesta por actividad volcánica [15].

Independientemente de su grado de reactividad, todas las arcillas están compuestas en mayor o menor cantidad de "aluminio-silicatos". A partir de este "denominador" común, esta investigación se enfoca en **la aplicación experimental de los principios de geopolimerización como estrategia para mejorar las características resistentes de materiales a base de arcilla natural.**

Debido a la extensión del universo al que se hace referencia al hablar del estudio de geopolímeros y a las limitaciones de recursos destinados a esta investigación, ha sido necesario acotar el campo de acción enfocándolo al estudio y experimentación de materiales de arcilla polimerizada por procedimientos análogos a la geopolimerización (activación alcalina) para analizar principalmente el comportamiento mecánico (resistencia a compresión y flexión) y la energía incorporada.

15 Lemounga, P. N., MacKenzie, K. J. D., Melo, U. F. C. (2011). *Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash*. *Ceramics International*, 37(8), 3011–3018. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.002>.

* El término "material precursor" hace referencia al material o materiales de partida, es decir, a la materia prima utilizada para la fabricación de geopolímeros.

1.3 HIPÓTESIS

Esta investigación parte de la hipótesis de que los principios de geopolimerización pueden ser aplicados a la fabricación de materiales de arcilla natural, incrementando su desempeño mecánico y manteniendo niveles más bajos de energía incorporada que los ladrillos de arcilla cocida.

1.4 OBJETIVOS

Objetivo principal:

Como objetivo principal se plantea probar los principios de geopolimerización en la fabricación de bloques experimentales de arcilla, con la intención de incrementar las características resistentes del material manteniendo niveles más bajos de energía incorporada que los ladrillos de arcilla cocida.

Objetivos secundarios:

Con el propósito de delimitar el estudio y focalizar los esfuerzos en base a los recursos disponibles para esta investigación teórica y experimental, se plantean los siguientes objetivos secundarios:

- Fabricar bloques experimentales de arcilla mediante procedimientos análogos a la geopolimerización.
- Analizar la resistencia a compresión y flexión de los bloques experimentales de arcilla geopolimerizada fabricados.
- Analizar la influencia de variables que intervienen en los procesos de polimerización de los bloques experimentales de arcilla geopolimerizada.
- Analizar el comportamiento de cuatro tipos de arcillas ante una misma estrategia de activación alcalina.
- Realizar análisis complementarios de caracterización de los bloques experimentales de arcilla geo-polimerizada.
- Analizar el comportamiento ambiental (energía incorporada en la fase de fabricación) de

bloques experimentales de arcilla polimerizada, comparándolos con ladrillos de arcilla cocida y bloques de tierra comprimida (BTC).

1.5 METODOLOGÍA

El trabajo de investigación es abordado por medio de dos metodologías. La primera, basada en el método de investigación documental, abarca la revisión del estado del arte. La segunda, basada en el método hipotético deductivo experimental, abarca el diseño y el desarrollo de una serie de campañas experimentales de laboratorio.

1.6 ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación está estructurada en dos apartados principales: estado del arte y estudio experimental de geopolímeros de arcillas en función de la resistencia mecánica.

Estado del arte

En lo referente al estado del arte (Capítulo 2), la investigación se estructura en dos partes:

- La primera parte incluye el estudio de las arcillas: definición; genealogía; estructura; clasificación; y propiedades.
- La segunda parte contiene el estado del arte referente a geopolimerización: antecedentes; definición; reseña histórica; terminología y estructura; fuentes de aluminosilicatos; activadores alcalinos; proceso de síntesis; otros factores implicados; impacto medioambiental; interés científico en geopolímeros; uso de geopolímeros en la construcción. Además el estado del arte e investigaciones enfocadas en la geopolimerización de arcillas: antecedentes, características poliméricas de los aluminosilicatos, aluminosilicatos laminares, reactividad de las arcillas, disolución de aluminosilicatos de arcilla e investigaciones destacadas.

Estudio experimental de geopolímeros de arcillas en función de la resistencia mecánica

El desarrollo del análisis experimental (Capítulo 3) se estructura en dos partes: métodos y materiales en la primera y resultados en la segunda.

- En el apartado de métodos y materiales se incluye: consideraciones generales; elección de materiales de partida; caracterización de las arcillas y diseño de experimentos.
- El apartado de resultados y discusión de resultados incluye: resistencia mecánica (resistencia a compresión y flexión); análisis de la influencia de variables en la resistencia a compresión; análisis del comportamiento de diferentes arcillas ante geopolimerización alcalina; análisis complementarios y análisis del impacto ambiental de geopolímeros a base de arcilla Tipo A.

Finalmente, en el Capítulo 4, se señalan las conclusiones del estudio experimental de geopolímeros de arcillas en función a su resistencia mecánica, el alcance de la investigación y las futuras líneas de investigación.



Fig. 2.0.1 . La "tierra" [geo], es un material compuesto por diferentes [poly] minerales o partes [meros] que tienen como principal conglomerante la arcilla (créditos en apartado: Lista de figuras, imágenes y créditos).

Estado del arte

CAPÍTULO 2



Fig. 3.0.1 Desde tiempos remotos la arcilla a formando parte de la vida del hombre: (arriba) "Los Guerreros de Terracota" o guerreros de Xian moldeados con arcilla hace más de 2200 años (China 210-209 a. C.); (abajo) Imagen (SEM) con una magnificación de 24000x de láminas de arcilla caolinitica tomada con un microscopio electrónico Thermo Fisher Scientific (2011) [créditos en apartado: Lista de figuras, imágenes y créditos].

2.1 LAS ARCILLAS: NANOMATERIALES NATURALES

CONTENIDO:

- 2.1.1 Antecedentes
- 2.1.2 Definición
- 2.1.3 Genealogía de las arcillas
- 2.1.4 La estructura de las arcillas
 - 2.1.4.1 Hoja tetraédrica (Tipo T)
 - 2.1.4.2 Hoja Octaédrica (Tipo O)
 - 2.1.4.3 Hoja mixta (Tipo T-O)
 - 2.1.4.4 Hoja mixta (Tipo T-O-T)
 - 2.1.4.5 Disposición atómica
 - 2.1.4.6 Otros minerales
 - 2.1.4.7 Poros
- 2.1.5 Clasificación de las arcillas
 - 2.1.5.1 Grupo 1:1
 - Los caolines
 - La halloysita
 - 2.1.5.2 Grupo 2:1
 - Las esmectitas
 - Las micas
 - Illitas
 - Cloritas
 - Vermiculitas
 - Palygorskita (atapulgita): sepiolita
 - Minerales de capa mixta
- 2.1.6 Propiedades de la arcilla
 - 2.1.6.1 Interacción agua - arcilla
 - 2.1.6.2 Efectos de la temperatura

2.1.1 ANTECEDENTES

Al hablar de los antecedentes de la arcilla es imperativo hacer referencia a la "tierra" (detalles en el Anexo 3.0). Las arcillas están disponibles en la mayor parte de la superficie terrestre. Se puede decir que casi todos los suelos contienen arcilla en menor o mayor proporción y en comparación a otros minerales o materiales utilizados en la construcción, su obtención requiere poca energía. Esta es la principal razón por la que la "tierra", a lo largo de la historia, se convirtió en el material de construcción más utilizado. Pese a ello, la tendencia marcada en el pasado cambió a partir del advenimiento de los materiales y la arquitectura moderna. La "tierra", con la arcilla

como conglomerante principal, poco a poco ha sido y es desplazada por materiales procesados que muestran mejores características resistentes.

La resistencia mecánica y la humedad son las razones principales por las cuales los materiales tradicionales a base de arcilla cruda adolecen de una imagen deficiente, no cumplen con algunos estándares de productividad, calidad y no pasan muchas de las pruebas de durabilidad y requerimientos técnicos superados por materiales industriales [1]. Además, las estructuras a base de barro comúnmente requieren un alto mantenimiento ya que son propensas a la erosión bajo la lluvia, al fácil deterioro de sus superficies, al agrietamiento ante pequeños esfuerzos de tracción y/o compresión y a un crítico comportamiento ante acciones dinámicas en zonas sísmicas [2].

1 Damme, H. Van, & Houben, H. (2017). *Earth concrete . Stabilization revisited*. Cement and Concrete Research Journal.

2 Miccoli, L., Müller, U., & Fontana, P. (2014). *Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob*. Construction and Building Materials, 61, 327–339. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>.

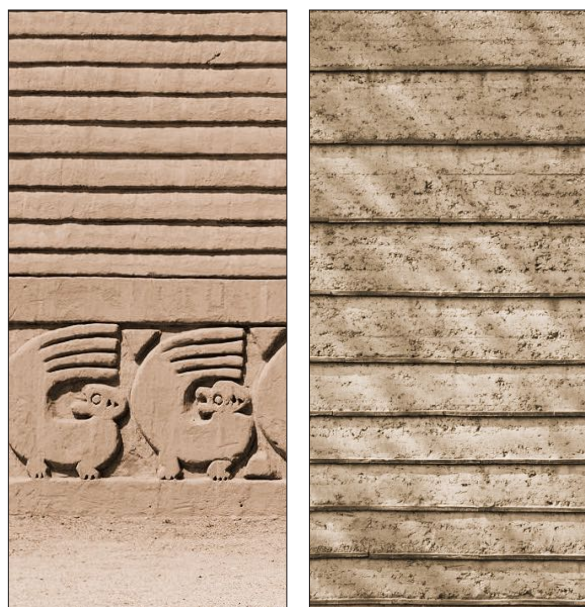


Fig. 3.1.1 Ejemplos de la utilización tradicional de la arcilla cruda como conglomerante principal de los materiales de construcción. (Izquierda) Muro de “tierra” apisonada en la antigua ciudad de Chan Chan- Perú, construido aproximadamente hace 2600 años. (Derecha) Muro de “tierra” apisonada en la casa *Lehmhaus Rauch*, en el poblado de Schlins - Austria, construida por Martin Rauch en el año 2008.

En el contexto de la arquitectura, la problemática ambiental ha repercutido en el estudio científico de mecanismos de estabilización de materiales a base de arcilla cruda (adobes, BTC, tapial, etc.) para su utilización como materiales de construcción “modernos” [3]. Investigaciones sobre la influencia de agregados de plantas y fibras, mezclas con cal, uso de cenizas, adición de cemento, uso de metacaolín, uso de residuos industriales, etc., son muestras de un gran abanico de estudios llevados a cabo en los últimos años, pero sin repercusiones notables en aplicaciones que cumplan las demandas actuales de la arquitectura y la construcción.

Actualmente los “estabilizantes modernos” de materiales a base de arcilla cruda de uso más frecuente son el cemento, la cal y el betún que comúnmente se agregan en proporciones que van del 5 al 15% en peso [4]. De estos, el cemento Portland es el más utilizado aunque estudios recientes no recomiendan su empleo y evidencian problemas inherentes a incompatibilidad e impacto ambiental [5]. De todos modos, los materiales tradicionales de construcción a base de arcilla cruda no han podido alcanzar la resistencia mecánica de los materiales procesados con gran cantidad de energía.

Comúnmente el enfoque de la investigación de la arcilla se ha basado en aspectos geológicos, geotécnicos y mineralógicos, mientras que su estudio desde una orientación físico química es reciente. La complejidad de este material sigue presentando desafíos a investigadores pues, a pesar de los considerables avances tecnológicos con los que hemos llegado al siglo XXI, existen

3 Venkatarama Reddy, B. V., & Latha, M. S. (2014). *Retrieving clay minerals from stabilised soil compacts*. Applied Clay Science, 101, 362–368. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2014.08.027>.

4 Gallipoli, D., Bruno, A. W., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). *A geotechnical perspective of raw earth building*. Acta Geotechnica, 12(3), 463–478. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1007/s11440-016-0521-1>.

5 Damme, H. Van, & Houben, H. (2017). *op. cit.*

aspectos que se desconocen [6].

En el transcurso de la historia, el microscópico tamaño de las partículas que conforman la arcilla constituyó un obstáculo para entender la estructura y comportamiento del material, dado que las técnicas de caracterización y análisis se restringía a métodos imprecisos o al uso del microscopio petrográfico.

Con el descubrimiento de los rayos X se inauguraron nuevas posibilidades de estudio y análisis de estos y otros materiales. En la actualidad, la combinación de técnicas de análisis: análisis por difracción de rayos X (DRX); análisis por fluorescencia de rayos X (FRX), análisis termogravimétrico (ATG); microscopía electrónica de barrido (SEM); análisis de distribución de tamaños de partícula mediante difracción láser (ADL); etc., hace posible caracterizaciones químico-estructurales mucho más precisas de las partículas de arcilla.

La variedad de parámetros que influyen en la interacción de los minerales de arcilla con otros agentes (incluyendo el agua), evidencia la importancia de relacionar las propiedades microscópicas y el comportamiento macroscópico [7]. Esto representa un factor de gran importancia para el futuro próximo de los materiales a base de arcillas y para la arquitectura.

Este apartado trata el estado del arte de las arcillas. El objetivo de este estudio es tener un acercamiento que permita un mayor entendimiento del comportamiento del material a escala microscópica, con el afán de adquirir las herramientas teóricas necesarias para el estudio de mecanismos de optimización del material. Es así que a continuación se abordan los siguientes temas: definición, genealogía, estructura, clasificación y propiedades de las arcillas.

2.1.2 DEFINICIÓN

La definición de arcilla puede variar de acuerdo al campo desde el que es enunciada. Además, desde la primera vez que fue "definida" por Agrícola (1546) [8] numerosas publicaciones nos permiten deducir que la definición de arcilla está sujeta a una transformación constante que varía a causa de los avances en la ciencia, desarrollo de herramientas de estudio y diferentes aplicaciones.

Según la definición de arcilla en el diccionario de la RAE (Real Academia Española), "*arcilla es la tierra finamente dividida, constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados, que procede de la descomposición de minerales de aluminio, blanca cuando es pura y con coloraciones diversas según las impurezas que contiene.*"

Según la *Association Internationale Pour l'Etude Des Argile, AIPEA* (Asociación Internacional de Estudio de Arcillas) y la *Clay Minerals Society, CMS* (Sociedad de Minerales de Arcilla), la arcilla es un material natural compuesto principalmente de minerales de grano fino, que generalmente puede ser plástico con contenidos apropiados de agua y endurecer al secarse o cocerse [9].

Su formación obedeció a tres mecanismos principales: por herencia (es decir, derivado directamente de la roca madre), por neo formación y por transformación (derivados de una reacción físico - química) [10].

Su composición química está caracterizada principalmente por la presencia de Si, Al y H₂O, junto a cantidades variables de Mg, Mn, Fe, Ca,

6 Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). General introduction: Clays, clay minerals, and clay science. *Developments in Clay Science*, vol.5, p.1–19. Última consulta 17/07/2018: <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00001-8>.

7 Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). *op. cit.* p.01.

8 M.C. Blandy, and J.A. Blandy. (1955). De Natura Fossilium (Textbook of Mineralogy) by Georgius Agrícola » Translated from the First Latin Edition of 1546. *Geological Society of America*. Special Paper, 63 (1955).

9 Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). *op. cit.* p 5.

10 Domínguez, J., & Schifter, I. (1995). "Las arcillas: el barro noble" en: *La ciencia para todos*. [en línea] México: Fondo de Cultura Económica, vol.3: Química. Última consulta 17/07/2018: <https://bit.ly/2zL97zT>.

Na y K [11]. Por ello desde una definición alternativa se podría decir que los minerales de arcilla se clasifican tradicionalmente como "silicatos", pero dado que sus fórmulas (composiciones químicas) tienen más oxígeno que Si, Al o Mg, pueden considerarse hidróxidos de silicio, aluminio o magnesio [12].

El tamaño de partícula es determinante en todas las definiciones de arcilla. Algunas disciplinas consideran que el tamaño de partícula debe ser inferior a $4\mu\text{m}$ (como por ejemplo en geología, sedimentología y geingeniería). De todos modos se ha demostrado que los minerales de la arcilla se concentran en la fracción granulométrica de $1\text{-}2\mu\text{m}$ (quedando los minerales no arcillosos por encima de esta medida), además parece ser el tamaño máximo en el que una partícula se mantiene suspendida coloidalmente [13]. La finura de las arcillas predetermina su vulnerabilidad y reactividad (Fig. 3.2.1). Por la misma razón las partículas de arcilla son susceptibles a tratamientos químicos y mecánicos [14].

Debido a las diferentes acepciones que pueden encontrarse, en este estudio nos referimos a la arcilla como un material natural que forma parte de la "tierra o suelo", con los filosilicatos como principales constituyentes, de grano fino ($<2\mu\text{m}$), que pueden tornarse plásticos (con pocas excepciones) y endurecen al secarse o cocerse.

2.1.3 GENEALOGÍA DE LAS ARCILLAS

Como se mencionó, las arcillas se sitúan dentro del árbol genealógico de los silicatos y se las considera filosilicatos por su estructura laminar. De lo que se sabe, los compuestos cristalinos a escala molecular están formados por planos y caras definidas, los cuales tienen la propiedad de difractar los rayos X.

A partir de 1931, con el desarrollo del microscopio electrónico se pudo observar la forma y geometría de dichos cristales minerales [15]. Se sabe que los silicatos están formados por cristales regulares que a su vez tienen una "unidad básica" idealizada como un tetraedro (Fig. 3.3.1). Todos los silicatos están caracterizados por la presencia de esta unidad [16].

Este tetraedro está compuesto de un átomo central de silicio (Si) y cuatro átomos de oxígeno (O) en las esquinas (Fig. 3.3.2 y Fig. 3.3.3). Puesto que cada átomo de silicio tiene cuatro cargas eléctricas positivas ($4+$) y cada átomo de oxígeno tiene dos cargas negativas ($2-$) es necesario que cada uno de los átomos de oxígeno use una de sus cargas para atraer a una de las cargas del silicio, quedando así saturado el átomo central de silicio ($(\text{SiO}_4)^{4-}$). Las esquinas de los átomos de oxígeno tendrán una carga negativa que servirá para asociarse a otro átomo de silicio con carga positiva y formar una cadena.

11 Departamento de Tecnología de la Construcción. *Geología Aplicada. Documento online sobre Arcillas*, Universidad de Coruña. (2017). Última consulta 17/07/2018: <https://bit.ly/2LsLQE0>.

12 Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). *op. cit.* p 13.

13 Grim, Ralph E. (1968). *Clay Mineralogy*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.

14 Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). *op. cit.* p. XiX.

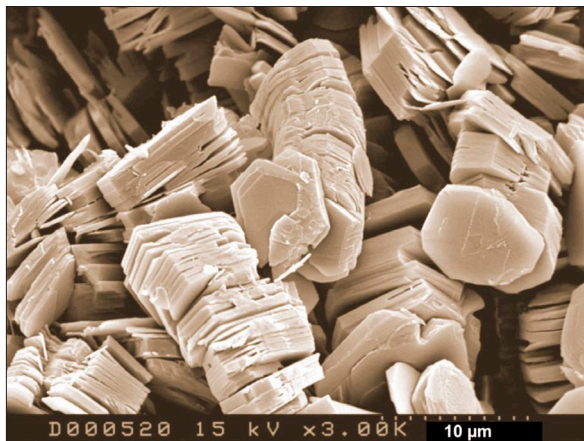
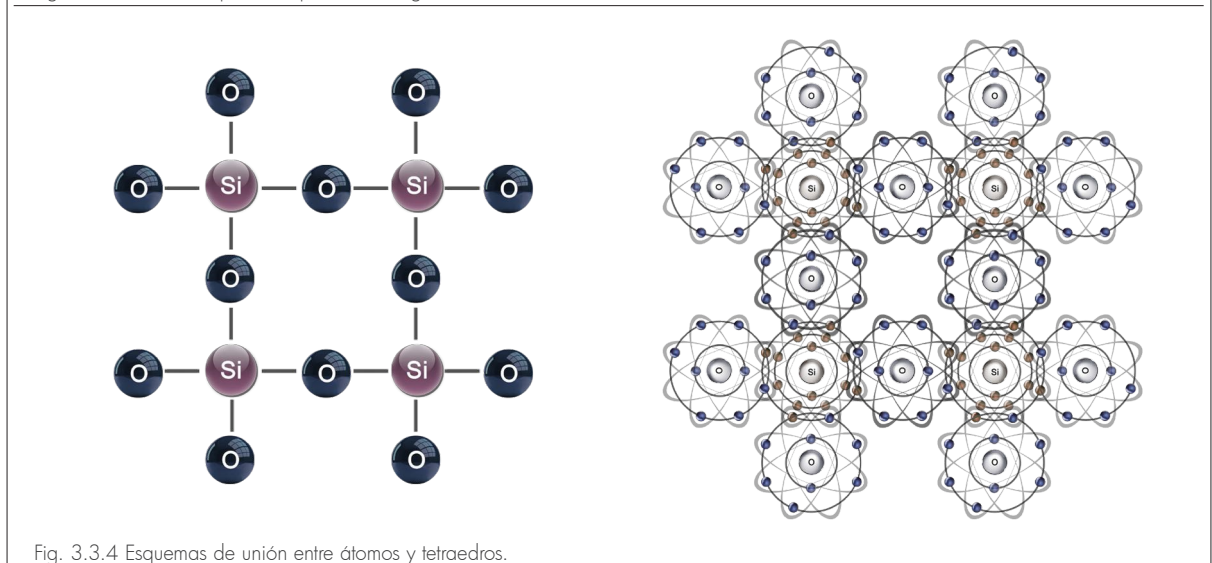
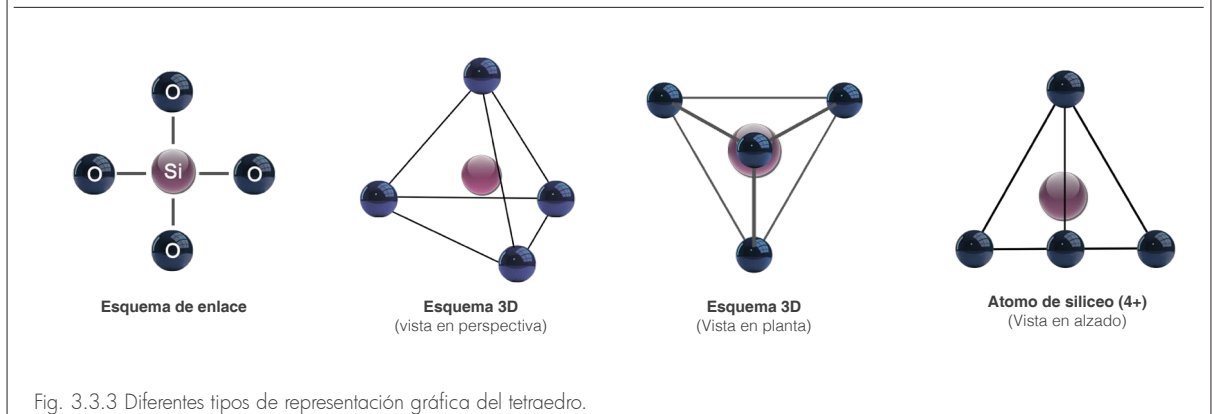
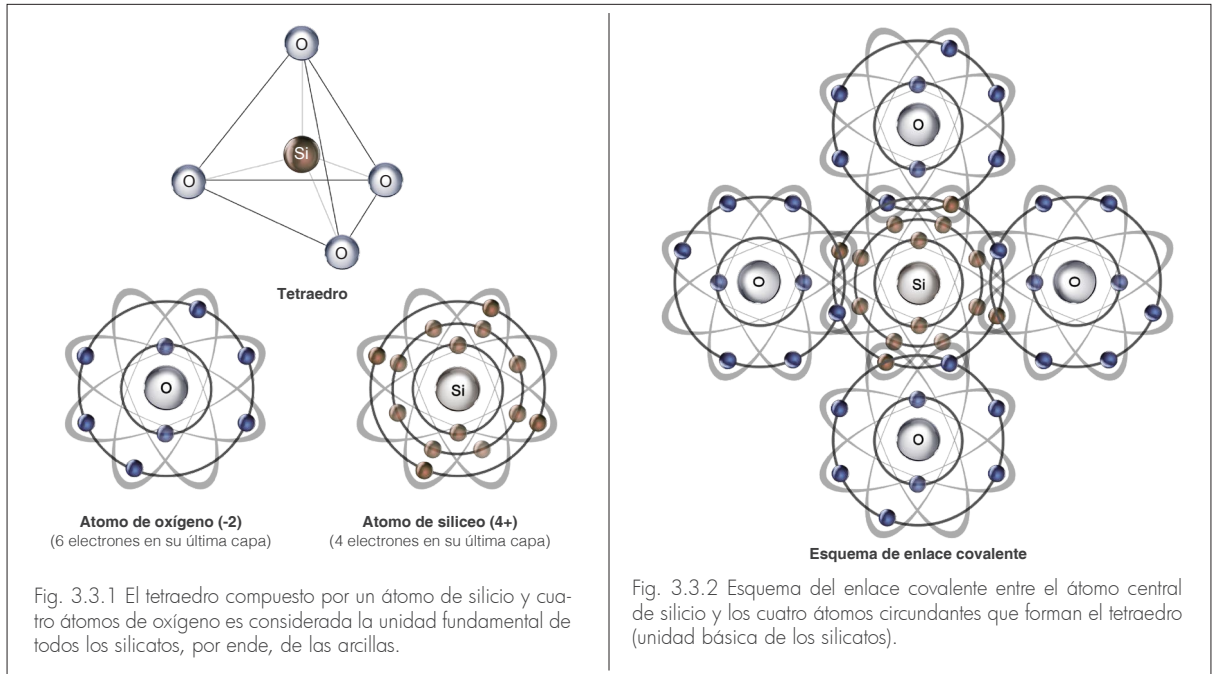


Fig. 3.2.1 El tamaño de partícula es una característica determinante de las arcillas. En la imagen SEM de arcilla caolinita bien cristalizada de arenisca, es posible observar la morfología hexagonal, las superficies basales lisas y la abundancia de poros.

15 Domínguez, J., & Schifter, I. (1995). *op. cit.*

16 Grimshaw, Rex W.; Broadhead Searle, A. (1990). *The chemistry and physics of clays and allied ceramic materials*. 4th ed. Herndon, VA: TechBooks. p.99.



Existen tres reglas básicas para unir tetraedros [17]:

A) La suma de las cargas positivas debe ser igual a la suma de las cargas negativas, de modo que la estructura sea eléctricamente neutra.

B) Todos los elementos con carga positiva (Cationes) pueden enlazarse o rodearse de elementos cargados negativamente, coordinándose con ellos de modo que la coordinación dependa

únicamente de la relación entre el catión (+) y el anión (-) respectivo.

C) No es válido enlazar dos tetraedros que tengan un átomo central de aluminio cada uno, es decir, dos tetraedros de aluminio pueden unirse mediante un tetraedro intermedio de silicio.

(A y B: Reglas de *Pauling*, y C: Regla de *Lowenstein*)

17 Dominguez, J., & Schifter, I. (1995). op. cit.

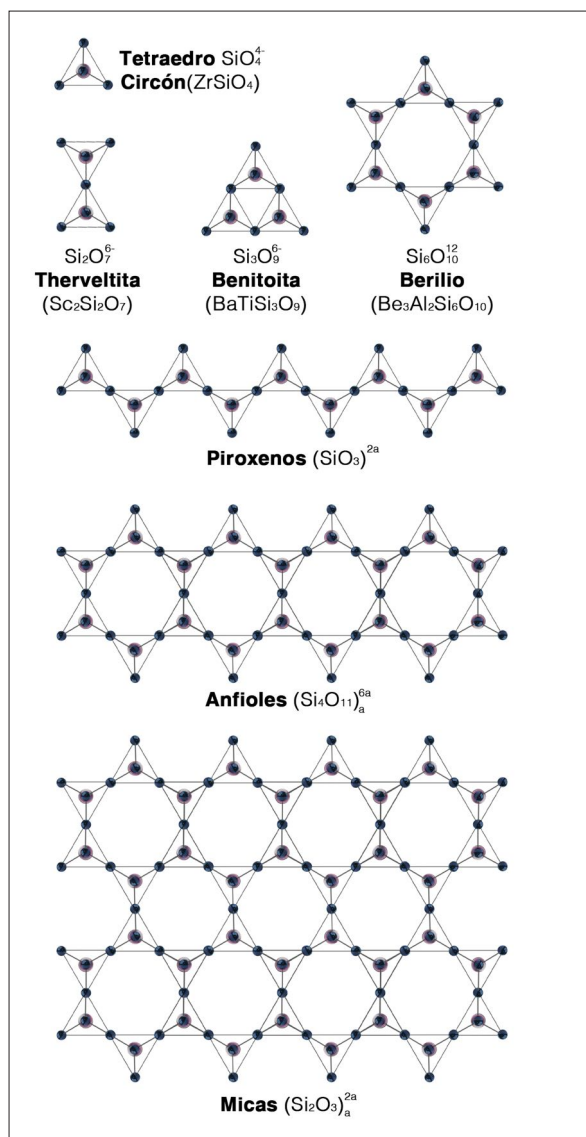


Fig. 3.3.5 Ejemplos de minerales y esquemas de posibles uniones entre tetraedros en forma de redes simples y compuestas que dan origen a los diferentes tipos de silicatos.

Mediante este mecanismo podemos formar cadenas horizontales y verticales para formar redes y construir conjuntos tridimensionales (Fig. 3.3.4 y Fig. 3.3.5). Debido a la capacidad de atracción eléctrica entre átomos, es posible sustituir uno de los átomos de silicio por otros átomos, por ejemplo de aluminio (Al), con lo cual el conjunto quedaría desequilibrado ya que el aluminio tiene tres cargas eléctricas positivas en vez de cuatro, dejando una carga negativa "extra" en uno de los átomos de oxígeno. La carga negativa puede ser satisfecha por un catión positivo, por ejemplo el sodio (Na), calcio (Ca), el potasio (K), etc. (Fig. 3.3.6), con lo cual se logra nuevamente una estructura neutra. Esta propiedad de intercambio iónico permite a los silicatos establecer diferentes composiciones que afectan las características físicas y químicas de los materiales.

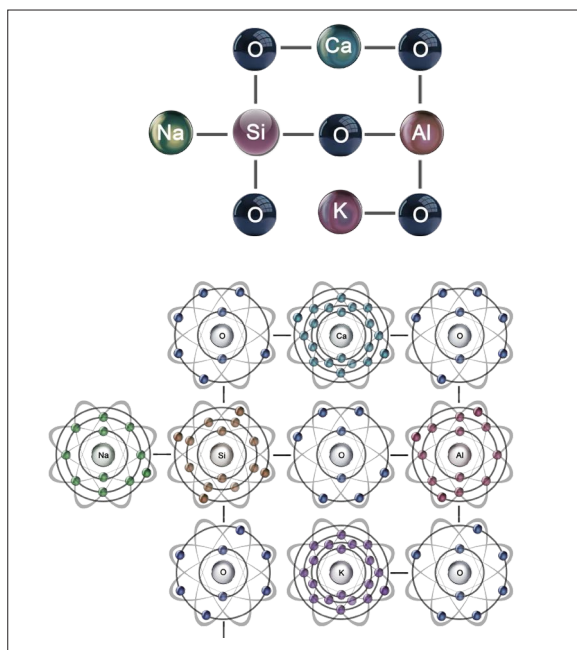


Fig. 3.3.6 Ejemplos de enlaces covalentes que pueden darse entre diferentes elementos, gracias a las características eléctricas y a la capacidad de compartir electrones entre sí.

2.1.4 LA ESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS

Desde el punto de vista mineralógico, los minerales de la arcilla son silicatos que pertenecen al grupo de los filosilicatos (*phyllos* = hoja) o silicatos en hojas. Estos silicatos laminares se componen de la asociación de varias láminas apiladas que son partículas muy finas, de forma aplanada y por tanto con una superficie específica muy elevada (Fig. 3.4.3).

A gran escala cada lámina posee una notable relación de aspecto, alrededor de 100 a 200 nm de longitud y 1nm de espesor [18] (Fig. 3.4.1).

2.1.4.1 Hoja tetraédrica (Tipo T)

La unión de tetraedros genera láminas u hojas que se extienden dando origen a las estructuras laminares. Como se muestra en la Fig. 3.4.2, las puntas de los tetraedros se encuentran a la misma altura formando un plano, al igual que los átomos de silicio situados en el centro de los tetraedros y con los oxígenos situados en las bases. La articulación de estos tres planos nos conduce a la formación de una hoja tetraédrica (Tipo T) [19].

Una hoja tetraédrica está constituida por la organización de tetraedros $(\text{SiO}_4)^{4-}$, compartiendo tres de los cuatro oxígenos que poseen en el plano base (basal) mientras que el cuarto oxígeno se denomina apical. Este tetraedro se encuentra eléctricamente desequilibrado, ya que el silicio

18 Franco Urquiza, E.A.; Maspocho Rulduà, M.L. (2009). Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos. En: *Ingenierías*. [en línea] 12(44), p. 35–41. p37. Última consulta 17/07/2018: <https://bit.ly/2uFIHh6>.

19 Domínguez, J., & Schifter, I. (1995). op. cit.

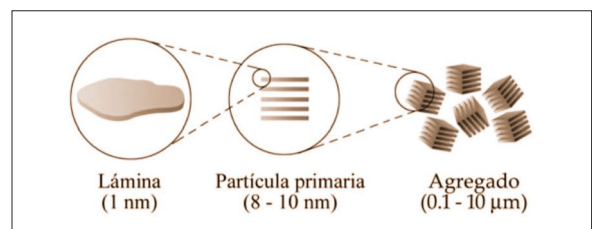


Fig. 3.4.1 Las arcillas pertenecen al grupo de los filosilicatos. Presentan una estructura laminar.

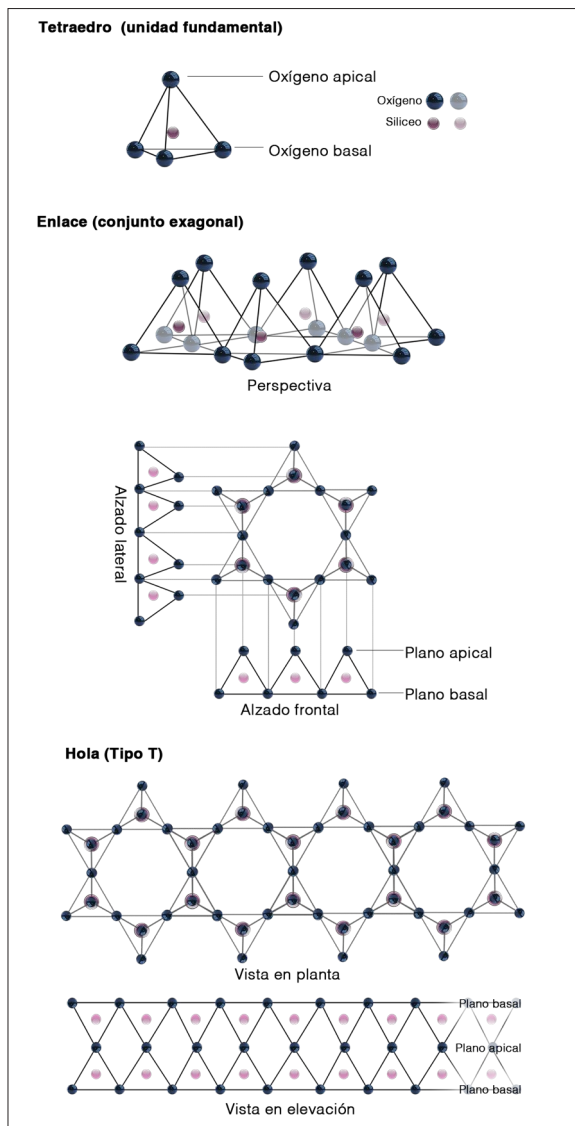
aporta cuatro cargas positivas (Si^{4+}) frente a las ocho cargas negativas de los cuatro oxígenos presentes en los vértices del tetraedro, por lo que debe unirse a otros cationes para neutralizar sus cargas. Para ello, cada vértice de la cara basal pertenece a dos tetraedros vecinos, ya que cada átomo de oxígeno está en coordinación con dos átomos de silicio, formando capas tetraédricas que se distribuyen bajo la configuración de hexágonos [20].

Siguiendo esta secuencia podemos unir láminas para formar hojas tetraédricas, en la que dos hojas se encuentran invertidas una con respecto a la otra compartiendo los vértices (Fig. 3.4.2).

2.1.4.2 Hoja Octaédrica (Tipo O)

Existen otros polígonos que podemos unir entre sí para formar cadenas, tal es el caso del octaedro (ocho caras), formación típica de los compuestos del aluminio, por ejemplo $\text{Al}(\text{OH})_6$ o del magnesio.

Estas estructuras forman hojas octaédricas (Tipo O). De la misma forma que los tetraedros, los octaedros se encuentran eléctricamente desequilibrados ya que tienen dos cargas positivas (si el catión es Mg^{2+}) o bien, tres cargas positivas (si el catión es Al^{3+}), frente a las doce cargas negativas aportadas por sus seis vértices. Para neutralizarse, los vértices tienen que compartirse entre sí formando una capa



20 Franco Urquiza, E.A.; Maspoeh Rulduà, M.L. (2009). op. cit.

Fig. 3.4.2 Composición de una lámina tipo T mediante la unión de tetraedros (SiO_4)⁴⁻.

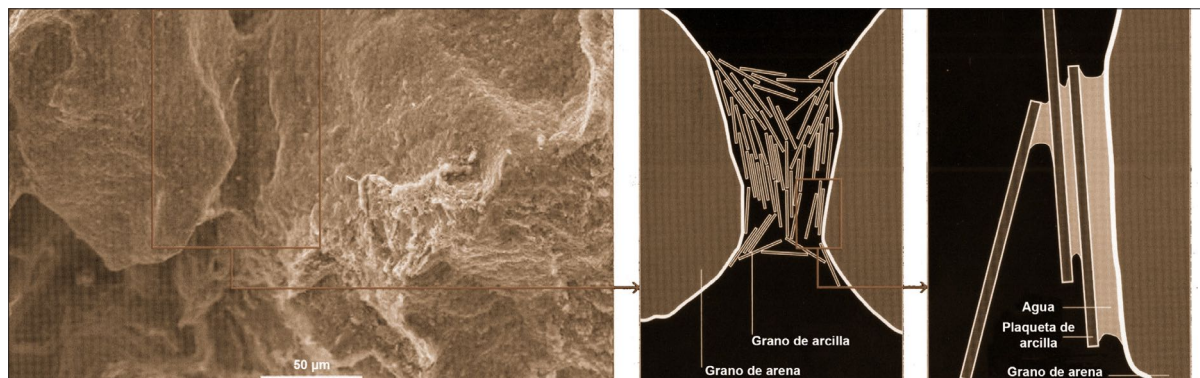


Fig. 3.4.3 Los filossilicatos se componen de varias láminas aplanadas apiladas y por tanto con una superficie específica elevada. Estos actúan como conglomerantes del resto de silicatos presentes en los suelos.

octaédrica (Fig. 3.4.4). Los octaedros se posan en una de sus caras la cual representa el plano basal [21].

2.1.4.3 Hoja mixta (Tipo T-O)

La unión de una hoja tipo T con un hoja tipo O genera una lámina T-O o lámina 1:1. La coincidencia no es exacta en el acople de hojas T formadas por silicio-oxígeno y hojas O formadas por aluminio-oxígeno, esto crea un efecto de esfuerzo entre láminas lo cual es de gran importancia para algunas aplicaciones de las arcillas de láminas (T-O) como es el caso del caolín.

2.1.4.4 Hoja mixta (Tipo T-O-T)

Si agregamos una tercera lamina T a las dos capas anteriores (T-O) se consigue una lámina T-O-T o una lámina del tipo 2:1 (Fig. 3.4.4). Tanto los octaedros como los tetraedros que constituyen estas capas son idealizados, no existen en realidad, pero constituyen un esquema que nos ayuda a visualizar y entender la estructura laminar de los minerales de arcilla (Fig.3.4.5). Los átomos de silicio, oxígeno, aluminio, etc., así como los respectivos cationes y aniones en las hojas tetraédricas y octaédricas están unidos (coordinados) mediante enlaces covalentes [22].

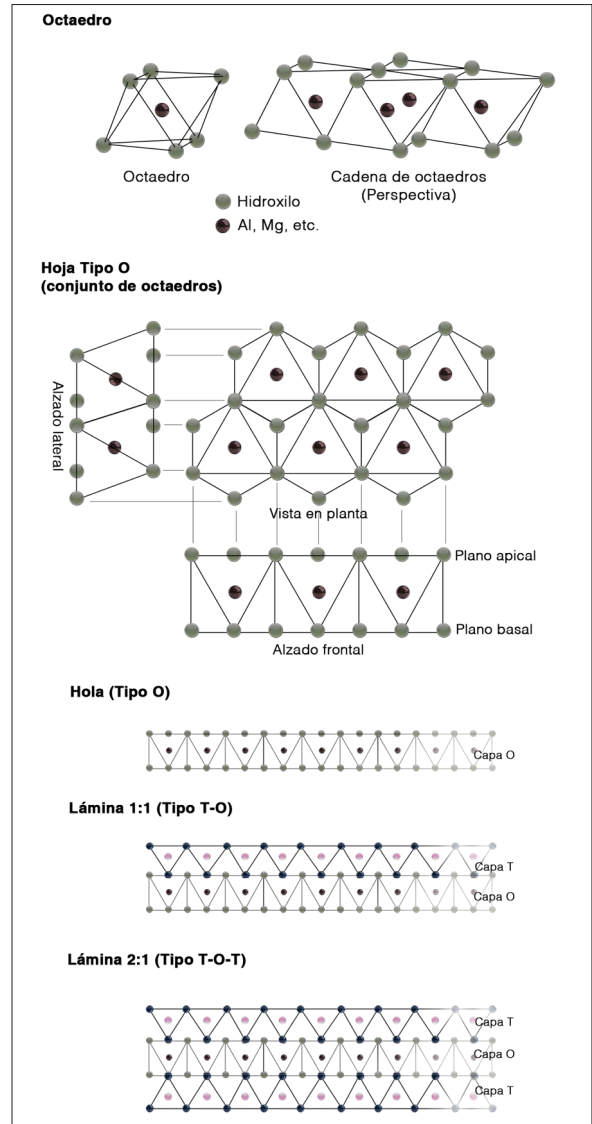


Fig. 3.4.4 Composición de una lámina tipo O mediante la unión de octaedros, y composiciones de láminas tipo T-O y T-O-T.

21 *Ibíd.*

22 Departamento de Tecnología de la Construcción. *Geología Aplicada*, op. cit..

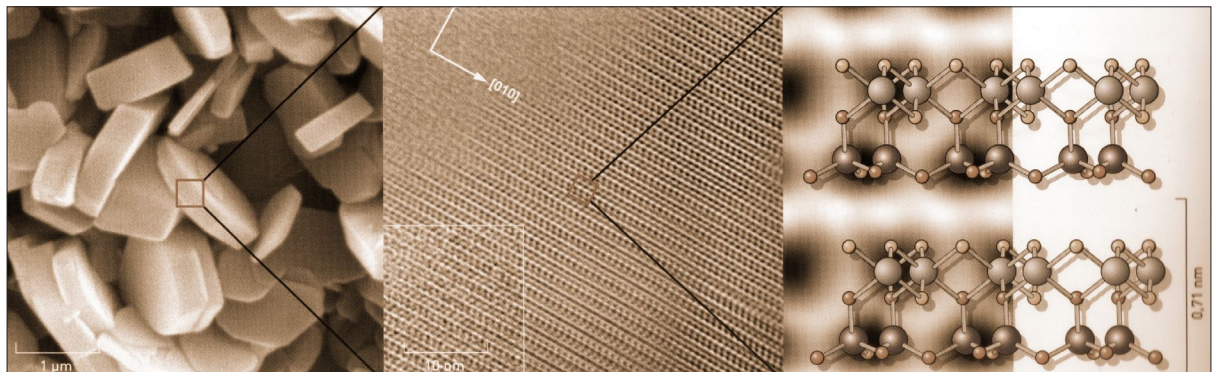


Fig. 3.4.5 Tanto tetraedros como octaedros y esquemas T, T-O y T-O-T son idealizados pero nos ayudan a visualizar y entender la estructura laminar de los minerales de arcilla.

2.1.4.5 Disposición atómica

Es posible representar la disposición atómica a través de planos atómicos, tal como se muestra en la figura (Fig. 3.4.6).

El primer plano es el plano basal, conformado por los átomos de oxígeno. El segundo plano contiene los átomos de silicio, ocupando algunos espacios libres de la capa basal de cada tetraedro.

En el tercer plano están ubicados los átomos de oxígeno (oxígenos apicales) de los tetraedros que se sitúan sobre los átomos de silicio. Este plano une las capas tetraédricas y octaédricas mediante el enlace entre los oxígenos apicales y Mg^{2+} y/o Al^{3+} octaédrico. Pese a ello, no todos los vértices del plano basal (en mayor parte átomos de oxígeno apicales) de los octaedros quedan enlazados con los átomos de silicio de los tetraedros, por lo que para compensar cargas se enlazan a átomos de hidrógeno (H) formando grupos hidroxilo (OH), tal como se representa en la figura (Fig. 3.4.7). Por tanto, el plano basal del octaedro forma parte del plano superior o apical de los tetraedros.

El cuarto plano contiene iones Mg^{2+} y/o Al^{3+} octaédricos ubicados en pequeños espacios libres

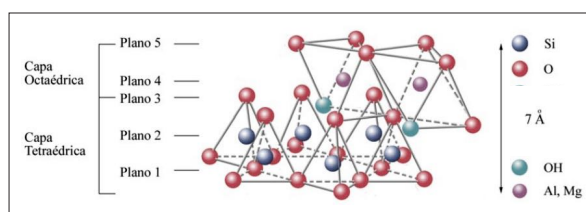


Fig. 3.4.6 Disposición atómica.

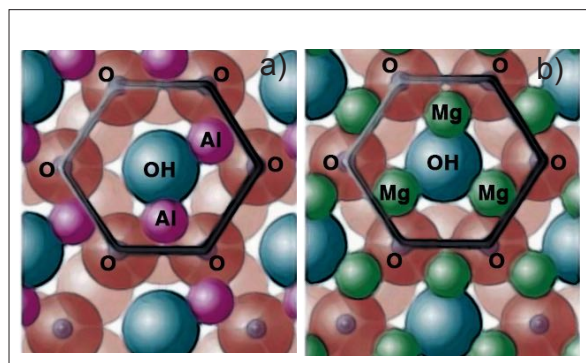


Fig. 3.4.7 Vista superior de los planos a) dioctaédrico y b) trioctaédrico.

entre dos oxígenos apicales y un OH. Con el Mg^{2+} todos los espacios estarían ocupados (tres de tres), formando un "plano trioctaédrico" (Fig. 3.4.7 - b). Pero si el catión es Al^{3+} , algunos espacios quedarían desequilibrados ya que el Al^{3+} ocuparía dos espacios de los tres posibles, denominándose plano dioctaédrico (Fig. 3.4.7 - a).

El quinto plano es el plano superior de los octaedros, si la estructura termina en estos planos la arcilla estaría constituida por dos capas (capa T y Capa O), es decir una capa T:O o 1:1. Si se añade una nueva capa de tetraedros se formaría una estructura tipo T:O:T o 2:1 (o tipo "sándwich"). La lámina 1:1 tiene un espesor de 7Å y la lámina 2:1 de 9Å aproximadamente [23].

2.1.4.6 Otros minerales

Considerando el tamaño de partícula de las arcillas, la fracción de suelos y sedimentos que tienen partículas de $<2\ \mu\text{m}$ o $<4\ \mu\text{m}$, pueden contener minerales que no son filosilicatos, como carbonatos, feldespatos y cuarzo, junto con hidróxidos de hierro y aluminio. Dado que estos minerales no imparten plasticidad a la arcilla, se consideran "minerales asociados". Están estrechamente relacionados con el componente filosilicato de la arcilla y por tanto, interfieren con su identificación [24].

También están materiales no cristalinos o amorfos a los rayos X, incluida la materia orgánica independientemente de que sean o no parte de la plasticidad de la arcilla o las zeolitas, porque presentan algunos atributos similares.

En este contexto, existen otro tipo de sólidos que tienen propiedades similares a la de los filosilicatos en cuanto a su estructura laminar y características de carga pero no son componentes de la arcilla. Algunos ejemplos son los silicatos alcalinos, ácidos silícicos cristalinos, niobatos, fosfatos, titanatos y

23 Franco Urquiza, E.A.; Maspoch Rulduà, M.L. (2009). op. cit. pp.38-39.

24 Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). op. cit. p 10.

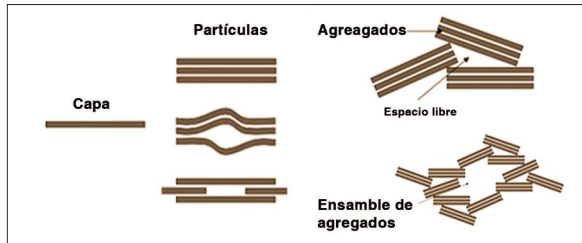


Fig. 3.4.8 Las arcillas son materiales porosos con espacios libres entre las capas, partículas y agregados que las conforman.

LDH (Compuestos similares a hidrotalcita) [25].

2.1.4.7 Poros

Un conjunto de láminas puede definirse como "partícula" y un conjunto de partículas como un "agregado". En consecuencia podemos distinguir entre poros inter capa, inter partícula e inter agregado (Fig. 3.4.8). La disposición de las partículas o agregados conduce a diferentes morfologías tales como: placas, túbulos, listones y fibras (Fig. 3.4.9). Todos los filosilicatos son porosos y contienen poros de variados tamaños y formas [26].

2.1.5 CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS

La clasificación de las arcillas puede variar dependiendo el área desde la que es estudiada. Las arcillas pueden clasificarse según diversos parámetros: mineralogía, química, origen geológico, propiedades físicas, uso industrial, comportamiento geotécnico, etc. [27].

Una clasificación mineralógica generalmente aceptada de las arcillas, adopta a la clasificación de los filosilicatos que parte de las diferentes disposiciones de las estructuras tetraédricas y octaédricas (Fig. 3.5.1 y Fig. 3.5.2).

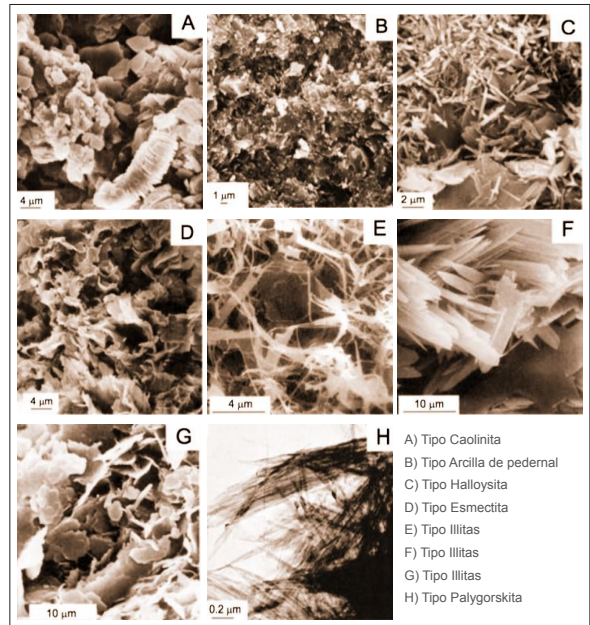


Fig. 3.4.9 Imágenes SEM (*Scanning Electron Microscope*) en donde se aprecian varias morfologías estructurales de varios tipos de arcilla.

Clasificación de las arcillas				
1. Amorfos	Grupo alofán			
	A. Tipo dos capas (1:1) (Estructuras de láminas compuestas de una capa de tetraedros de silicio y una capa de octaedros de alúmina)	1. Equidimensional	Grupo de caolinitas Caolinita, dickita, nacrita	
		2. Alargado	halloysita	
	B. Tipo tres capas (2:1) (Estructuras de láminas compuestas de dos capas de tetraedros de silicio y una capa central de octaedros dictaédrica o trioctaédrica)	1. Celosía expansiva	a. Equi-dimensional	Grupo Esmeclita Montmorillonita de sodio, montmorillonita de calcio, y beidellita
				Vermiculita
		2. Celosía no expansiva	b. Alargado	Esmeclita
				Nontronita, saponita, hectorita
	2. Cristalinas	C. Tipos de capas mixtas regulares (apilamiento ordenado de capas alternativas de diferentes tipos)	Grupo de cloro	
			D. Tipos de estructura de cadena (cadenas similares a hornblenda de tetraedros de silice unidos entre sí por grupos octaédricos de oxígenos e hidroxilos que contienen átomos de Al y Mg)	Sepiolita
				Palygorskita

Fig. 3.5.1 Clasificación de los minerales de arcilla (*Clay Mineralogy, Ralph E. Grim*).

25 Ibídem. p 10.

26 Ibídem. p 11.

27 Díaz Rodríguez, L. A.; Tordecillas, R. (2002). Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. [en línea] 41(5), p. 459–470. p 460. Disponible en: <http://boletines.secv.es/upload/20090429105008.200241459.pdf>.

Propuesta de clasificación de los filosilicatos incluidos minerales de arcilla			
Tipo de Capa	Grupo	Subgrupo	Minerales
1:1	Caolín	Caolines (Di) Serpentinas (Tri)	Caolinita, dickita nacrita, antigorita
	Talco/ pirofilita	Talcos (Tr) Pirofilitas	Talco Pirofilita
2:1	Esmectita	Montmorillonitas (Tr) Saponitas (Di)	Montmorillonita Saponita
	Vermiculita	Vermiculitas (Di) Vermiculitas (Tri)	Vermiculita (Di) Vermiculita (Tri)
	Mica	Micas y micas frágiles dioctaédricas y trioctaédricas	Bionita, moscovita, clintonita, margarita.
2:1:1	Clorita	Cloritas (Di) Cloritas (Tri)	Clinocloro, chamosita, sudolita, nimita
2:1 Capas invertidas	Sepiolita / palygorskita	Sepiolitas Palygorskitas	Sepiolitas, loughinita, palygorskita

Fig. 3.5.2 Propuesta de clasificación de los filosilicatos, incluidos minerales de arcilla. (Committee to the International Mineralogical Association -AIPEA).

2.1.5.1 Grupo 1:1

Los caolines

Fórmula estructural: $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$. Composición química teórica: SiO_2 , 46.54%; Al_2O_3 , 39.50%; y H_2O , 13.96%.

La estructura del caolín se basa en la lámina T-O, o lámina 1:1. Es decir, una hoja de tetraedros de silicio-oxígeno (hoja T) unida a otra hoja de octaedros de aluminio-oxígeno-OH (hoja O). El remplazo del silicio por aluminio, magnesio u otro elemento que pueda enlazarse provoca una modificación química del material manteniendo la misma estructura. Estas modificaciones en la estructura química da origen a la familia de los caolines (Fig. 3.5.3).

La primera rama de caolines comprende a aquellos minerales derivados de la caolinita que guardan la misma composición química por cada unidad estructural, éstos son la nacrita, dickita, anauxita, halloisita y el alofano, los cuales difieren entre sí sólo por su arreglo laminar [28].

La caolinita (Fig. 3.5.4) es la especie más abundante del sub grupo de los caolines. Aunque se han realizado cientos de análisis químicos de esta arcilla, aún no se sabe con certeza la composición

exacta de la mayoría de las muestras [29].

El otro grupo de caolines comprende el mismo tipo de estructura laminar (1:1), pero con sustitución del aluminio de la hoja octaédrica (tipo O) por otro catión, por ejemplo, hierro (Fe^{2+} , Fe^{3+}) o magnesio (Mg^{2+}).

Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO y CaO casi siempre están presentes en muestras de caolinita y es común encontrar K_2O y Na_2O . Las "impurezas" minerales como el cuarzo, el rutilo, la pirita, la limonita, el feldespato, la mica, la montmorillonita, y diversos óxidos de hierro y titanio, están comúnmente presentes a más de otros minerales [30].

La Halloisita

La Halloisita (Fig. 3.5.5) se presenta en dos formas, una con una composición $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$ y la otra con una composición $(OH)_8Si_4Al_4O_{10} \cdot 4H_2O$. Esta

29 Weaver, C. E.; Pollard, L. D. (1973). *The chemistry of clay minerals*. Amsterdam [etc.]: Elsevier Scientific. p 131.

30 Ibíd

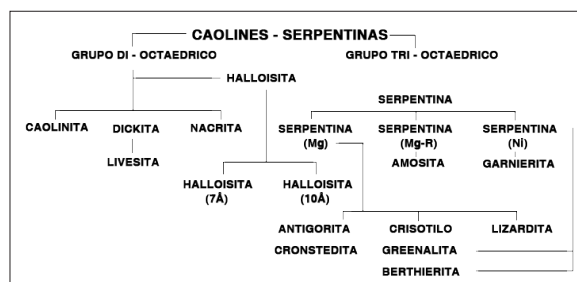


Fig. 3.5.3 Clasificación de los caolines - serpentinas.



Fig. 3.5.4 Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de cristales de caolinita.

28 Murray, H. H. (Haydn H.) (2007). *Applied clay mineralogy : occurrences, processing, and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays*. Amsterdam, Boston [etc.]: Elsevier. Última consulta 17/07/2018: <https://bit.ly/2zKRgJ9> . p 9.

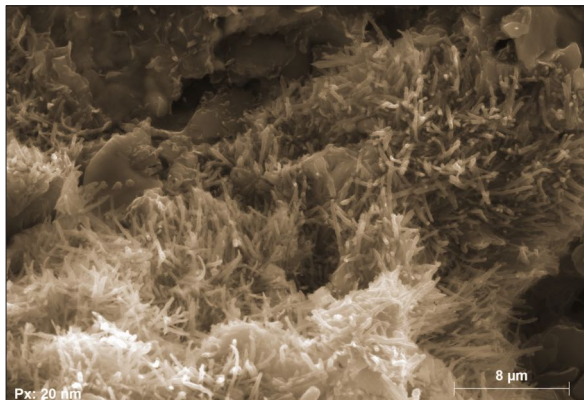


Fig. 3.5.5 Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de una Halloysita.

última forma se deshidrata de manera irreversible a temperaturas relativamente bajas [31].

2.1.5.2 Grupo 2:1

Las esmectitas

Fórmula estructural: $(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O$.
 Composición química teórica: SiO_2 , 66,7%; Al_2O_3 , 28.3%; y H_2O , 5% [32].

El grupo de las esmectitas (Fig. 3.5.6) está conformado por arcillas que presentan una estructura 2:1, es decir, por dos hojas de tipo T y otra hoja intermedia tipo O.

Los principales minerales de esmectita son montmorillonita de sodio, montmorillonita de calcio, saponita (montmorillonita de magnesio), nontronita (montmorillonita de hierro), hectorita (montmorillonita de litio) y beidellita (montmorillonita de aluminio). Los minerales de esmectita se componen de dos láminas tetraédricas de sílice con una lámina octaédrica central que puede ser dioctaédrica o trioctaédrica. Las moléculas de agua y los cationes ocupan el espacio entre las capas 2:1 [33].

Existen numerosos ejemplos de arcillas que presentan esta estructura tipo "sándwich". Algunas

veces el aluminio sustituye al silicio parcialmente en la capa T, o bien el magnesio o el hierro sustituyen al aluminio en la capa O; con menos frecuencia, el flúor (F) puede sustituir al oxígeno de la capa O. Estas diferencias de composición química hacen que las propiedades de cada arcilla sea distinta [34].

En esmectitas hay una considerable sustitución en la lámina octaédrica y parte en la lámina tetraédrica. En la lámina tetraédrica hay sustitución de aluminio por silicio hasta un 15% y en la lámina octaédrica magnesio y hierro por aluminio. Si las posiciones octaédricas se llenan principalmente con aluminio, el mineral de esmectita es beidellita; si está lleno de magnesio, el mineral es saponita; y si es sustituido por hierro, el mineral es nontronita. El mineral de esmectita más común es la montmorillonita cálcica, lo que significa que la deficiencia de carga de la capa se equilibra con el catión intercalando calcio y agua. El espaciamiento basal de la montmorillonita de calcio es 14.2\AA . La montmorillonita sódica se produce cuando la deficiencia de carga se equilibra con los iones de sodio y agua, y el espaciamiento basal es de 12.2\AA . Las montmorillonitas de calcio tienen dos capas de agua en la posición de la capa intermedia y las montmorillonitas de sodio tienen una capa de agua [35].

Entre todas las esmectitas, la rama de las arcillas dioctaédricas presenta propiedades muy interesantes derivadas de su estructura laminar, su espacio interlaminar y de la carga residual.

34 Dominguez, J., & Schifter, I. (1995). *op. cit.* p. 16.

35 Murray, H. H. (Haydn H. (2007). *op. cit.* p 14.

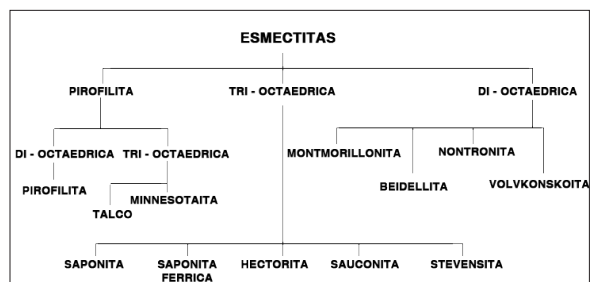


Fig. 3.5.6 Clasificación de las esmectitas.

31 Grim, R. . (1968). *op. cit.* p74.

32 Murray, H. H. (Haydn H. (2007). *op. cit.* p 13.

33 Ibídem. p 12.

Existe una gran variedad de arcillas tipo esmectita debido a la posibilidad de intercambio molecular (Fig. 3.5.7). De esta familia, la montmorillonita (Fig. 3.5.8) representa la variedad más destacada pero existe otra familia de arcillas que se asemeja: las vermiculitas que tienen la misma estructura 2:1 pero que pueden presentar un grado de sustitución mayor en la hoja octaédrica, originando una carga residual mayor que las montmorillonitas, la estructura es menos expansible y la atracción entre las láminas es mayor [36].

Las partículas minerales de esmectita son muy

pequeñas y debido a esto los datos de difracción de rayos X son difíciles de analizar [37].

Las micas

Las micas (Fig. 3.5.9) son minerales clasificados como arcillas de estructura 2:1 (la misma estructura que las esmectitas) pero difieren del resto de arcillas estructuralmente similares por el grado de sustitución y la naturaleza de los cationes que se alojan entre láminas, por ejemplo el potasio hace que la carga residual sea muy alta. Por ello, las láminas se fijan unas a otras haciendo que su estructura no sea expansible ni sus cationes inter laminares intercambiables [38].

Illitas

La illita (Fig. 3.5.10) es una mica mineral de arcilla, su estructura es una capa 2:1 en la cual el catión inter capas es potasio. El tamaño, la carga y el número de coordinación de potasio es tal que se ajusta cómodamente en el anillo hexagonal de oxígenos de las láminas tetraédricas de sílice adyacentes. Esto le da a la estructura un fuerte enlace iónico entrelazado que mantiene las capas individuales juntas y evita que las moléculas de agua ocupen la posición de la capa intermedia como lo hace en las esmectitas. Una forma simple de pensar sobre la illita es que es una esmectita de potasio.

La illita difiere de la moscovita bien cristalizada porque hay menos sustitución de Al^{3+} por Si^{4+} en

36 Dominguez, J., & Schifter, I. (1995). *op. cit.* pp.15-17.

Fórmula química de arcillas esmectitas del grupo 2:1.	
Mineral	Composición (octa) (tetra) O10 (OH)2
Pirofilita	$Al_2 Si_4 O_{10} (OH)_2$
Talco	$Mg_3 Si_4 O_{10} (OH)_2$
Minnesotaita	$(Fe, Mg)_3 Si_4 O_{10} (OH)_2$
Saponita	$Mg_3 (Si_{3.6}, Al_{.33}) O_{10} (OH)_2 nH_2O$
Saponita férrica	$(Fe^{2+}, Mg)_3 (Si_{3.6}, Al_{.33}) O_{10} (OH)_2 nH_2O$
Hectorita	$(Mg_{2.6}, Li_{.33}) Si_4 O_{10} (OH)_2 nH_2O$
Sauconita	$(Mg, Zn)_3 (Si_{3.6}, Al_{.33}) O_{10} (OH)_2 nH_2O$
Stevensita	$Mg_{3-x} Si_4 O_{10} (OH)_2$
Montmorillonita	$(Al_{1.67}, Mg_{.33}) Si_4 O_{10} (OH)_2 nH_2O$
Beidellita	$Al_2 (Si_{3.6}, Al_{.33}) O_{10} (OH)_2 nH_2O$
Nontronita	$Fe_2 3+ (Si_{3.6}, Al_{.33}) O_{10} (OH)_2 nH_2O$
Volkonskoita	$(Al, Fe^{3+}, Cr)_2 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_2 nH_2O$

Fig. 3.5.7 Fórmulas químicas de algunas esmectitas.

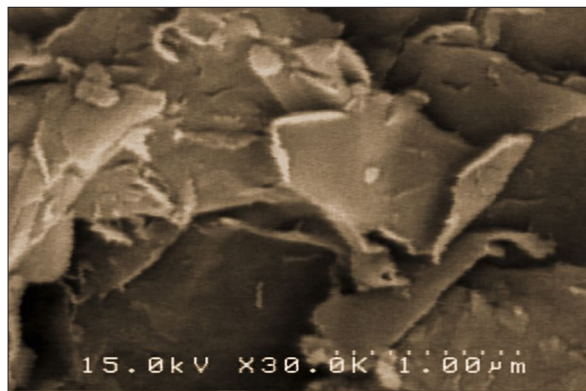


Fig. 3.5.8 Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de una montmorillonita.

37 Murray, H. H. (Haydn H. (2007). *op. cit.* p 14.

38 Dominguez, J., & Schifter, I. (1995). *op. cit.* p.18.

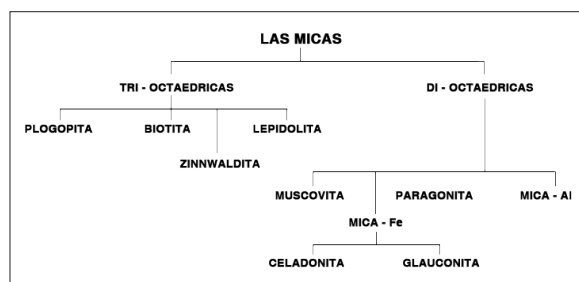


Fig. 3.5.9 Clasificación de las micas.

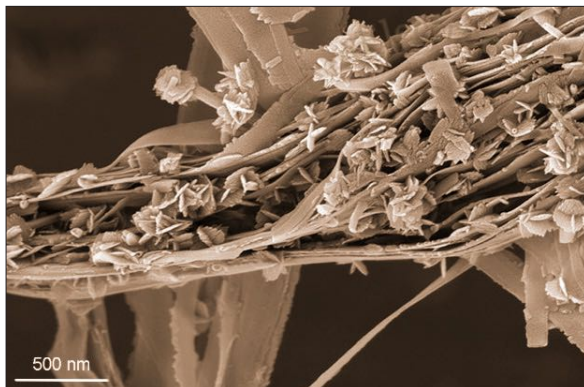


Fig. 3.5.10 Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de una illita.

la lámina tetraédrica. En la moscovita un cuarto del Si^{4+} se reemplaza por Al^{3+} , mientras que en la illita solo se reemplaza un sexto aproximadamente. Además, en la lámina octaédrica puede haber algunos reemplazos de Al^{3+} por Mg^{2+} y Fe^{2+} . La mayor deficiencia de carga está en la lámina tetraédrica en lugar de en la lámina octaédrica. Por esta razón y debido al ajuste el potasio une las capas en una posición fija para que el agua y otros compuestos polares no puedan entrar fácilmente en la posición de la capa intermedia, además el ion de potasio no es fácilmente intercambiable [39].

Cloritas

La clorita (Fig. 3.5.11) está presente en las pizarras y también en las capas inferiores asociadas con las vetas de carbón. La clorita es un mineral de capa 2:1 con una lámina intercalada de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Existe un amplio rango de sustituciones de cationes en las cloritas, generalmente Mg^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+} y Fe^{3+} . La composición de la clorita comúnmente se muestra como $(\text{OH})_4(\text{SiAl})_8(\text{Mg-Fe})_6\text{O}_{20}$. La clorita ha sido identificada en muchas areniscas como recubrimientos en granos de cuarzo que aparecen como rosetas. Por lo general la clorita está íntimamente entremezclada con otros minerales arcillosos, puede identificarse por el espaciamiento basal de 14Å que no se expande cuando se trata con etilenglicol, ni disminuye de 10Å al calentarse [40].

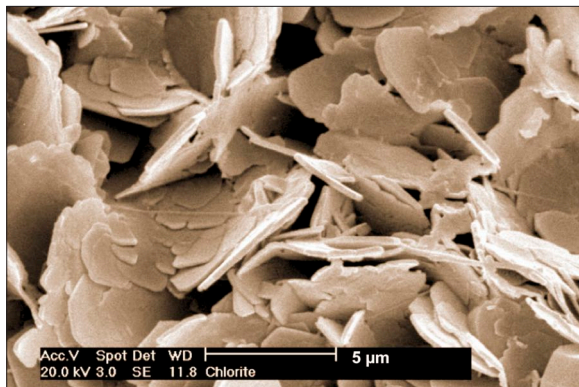


Fig. 3.5.11 Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de una clorita.

Vermiculitas

La estructura (Fig. 3.5.12) consiste en láminas de mica trioctaédricas o talco separadas por láminas de agua que ocupan un espacio definido ($4,98\text{Å}$) que es el espesor aproximado de dos moléculas de agua.

La estructura está desequilibrada principalmente por sustituciones Al^{3+} por Si^{4+} . Estas sustituciones pueden ser parcialmente equilibradas por otras sustituciones pero siempre hay una deficiencia de carga neta residual. La deficiencia de carga se satisface mediante cationes que se producen principalmente entre las capas de mica y son en gran medida intercambiables. En el mineral natural que tiene la misma capacidad de intercambio catiónico que la esmectita o algo superior, el catión de equilibrio es Mg^{2+} , a veces con una pequeña cantidad de Ca^{2+} también presente [41].

41 Grim, R. . (1968).. *op. cit.* p. 105.

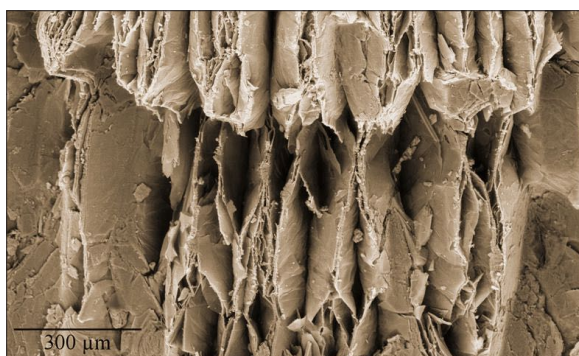


Fig. 3.5.12 Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de una vermiculita.

39 Murray, H. H. (Haydn H. (2007). *op. cit.* p. 16.

40 *Ibidem.* p. 17.

Palygorskita (atapulgita): Sepiolita

Los términos palygorskita y atapulgita son sinónimos. La Palygorskita (Fig. 3.5.13) y sepiolita son silicatos de capa 2:1. Las hojas tetraédricas están vinculadas en dos dimensiones. Tanto la palygorskita como la sepiolita son de forma alargada y a menudo se presentan como haces de partículas alargadas y similares a listones. Estos dos minerales de arcilla contienen dos tipos de agua, una coordinada para los cationes octaédricos y la otra flojamente unida en los canales, que se denomina agua zeolítica [42].

Minerales de capa mixta

Muchos materiales de arcilla están compuestos por más de un mineral de arcilla. Los minerales de arcilla se pueden mezclar de varias maneras. La mezcla puede ser de partículas minerales de arcilla en las que no hay una orientación geométrica preferida de una partícula con respecto a sus partículas vecinas de minerales de arcilla. Otro tipo de mezcla es la inter estratificación de los minerales de arcilla de capa en la que las capas individuales son del orden de una o varias láminas de aluminosilicato [43].

42 Murray, H. H. (Haydn H. (2007). *op. cit.* p. 19.

43 G Grim, R. . (1968). *op. cit.* p. 120.

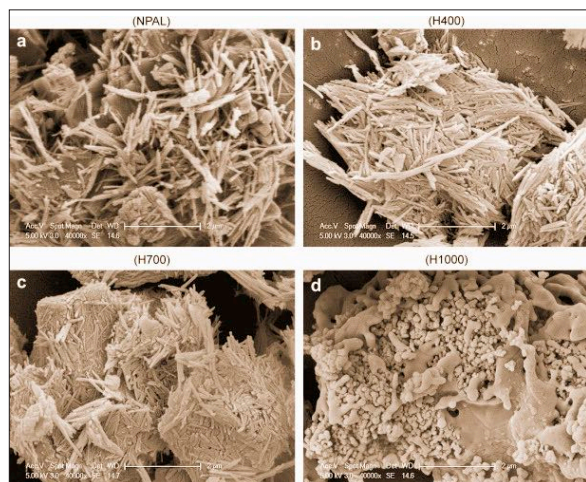


Fig. 3.5.13 Imágenes SEM (Scanning Electron Microscope) de una palygorskita.

2.1.6 PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS

Entre las características principales de la arcilla podemos señalar que están formadas por pequeños cristales, tienen la capacidad de intercambiar iones, son capaces de variar su composición química interna, pueden alojar moléculas en el interior de su espacio inter laminar, la superficie de las láminas presenta una actividad química considerable y muchos cambios de la estructura laminar pueden revertirse (Fig. 3.6.1) [44].

2.1.6.1 Interacción agua - arcilla

La arcilla en estado deshidratado cuenta con algunos iones de Sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), etc., en el espacio inter laminar. Desde el punto de vista electrostático las cargas negativas de la arcilla se acumulan en las superficies planas de las láminas mientras que los bordes acumulan cargas positivas. Luego los iones de sodio tienden a concentrarse sobre las caras planas.

A escala molecular, las fuerzas electrostáticas son de gran importancia. Las moléculas de agua son atraídas hacia las superficies planas debido a la presencia de iones de sodio cargados positivamente. En este estado las moléculas de agua se hacen más dipolares atrayendo a otras moléculas de agua, esto hace que la carga negativa incremente en las láminas mientras las moléculas de agua se enlazan unas con otras al aumentar su polarización.

Llega un momento en que la carga superficial de las láminas es tal que se repelen entre sí expandiéndose. Las moléculas de agua continúan llenando el espacio inter laminar neutralizando parcialmente las superficies y manteniéndolas separadas. El proceso se revierte cuando se eliminan las moléculas de agua mediante un proceso de secado, produciendo la retracción de las arcillas [45].

44 Dominguez, J., & Schifter, I. (1995). *op. cit.*

45 Ibídem.

Propiedades de los minerales de arcilla.	
1.	Una estructura de capas con una dimensión en el rango de nanómetros; el grosor de la capa 1:1 (TO) es de aproximadamente 0,7 nm, y el de la capa 2: 1 (TOT) es de aproximadamente 1 nm.
2.	La anisotropía de las capas o partículas.
3.	La existencia de varios tipos de superficies: superficies basales externas (planas) y de borde, así como superficies internas (entre capas).
4.	La facilidad con la que se puede modificar la superficie externa, y a menudo también la interna (por adsorción, intercambio iónico o injerto)
5.	Plasticidad
6.	Endurecimiento o secado a fuego; esto se aplica a la mayoría (pero no a todos) de los minerales de arcilla.

Fig. 3.6.1 Propiedades de los minerales de arcilla.

Comportamiento de algunas arcillas expuestas a temperatura				
Efecto	Caolinita	Illita	Esmectita	Clorita
Pérdida de H₂O absorbida	-	100 -200°C	110-200°C	-
Deshidroxilación	400-525°C	600-700°C	500-800°C	500-800°C
Destrucción de la red cristalina	550°C	850°C	850°C	850°C
Formación de Espinelas	950°C	900°C	1100°C	1200°C
Formación de Olivino	-	-	-	800-900°C
Formación de Mullita	1000°C	1100°C	1000°C	-
Formación de Enstatita	-	-	1000°C	1200°C
Formación de Cristobalita	1300°C	-	900°C	-

Fig. 3.6.2 La temperatura puede influir notablemente en el comportamiento de las arcillas.

2.1.6.2 Efectos de la temperatura

La temperatura juega un papel importante en la modificación estructural de las partículas de arcilla (Fig. 3.6.2), no solo porque promueve la deshidratación, sino porque es capaz de excitar las estructuras moleculares para la generación de nuevas estructuras en interacción con otros elementos.

Los minerales de arcilla pueden ser influenciados por la interacción con diversos agentes como el agua, sustancias ácido-base (pH y carga iónica) y condiciones termodinámicas (presión y temperatura).

La interacción entre minerales de arcilla y otros componentes puede darse en diferentes estados de la materia. Su composición química, su comportamiento frente a los agentes químicos y a procedimientos de alteración física, los convierten en minerales susceptibles a modificaciones predecibles.

Cada tipo de arcilla presenta características particulares pero también existen características comunes. El silicio y el aluminio, presentes en materiales precursores procesados utilizados comúnmente como materia prima para la elaboración de geopolímeros, en mayor o menor medida también son elementos comunes a las arcillas.

Por tanto, el estudio y la comprensión de la estructura y comportamiento de las arcillas constituye una herramienta importante para su uso en procesos geo-poliméricos. A continuación se aborda el estado del arte de la geo-polimerización.

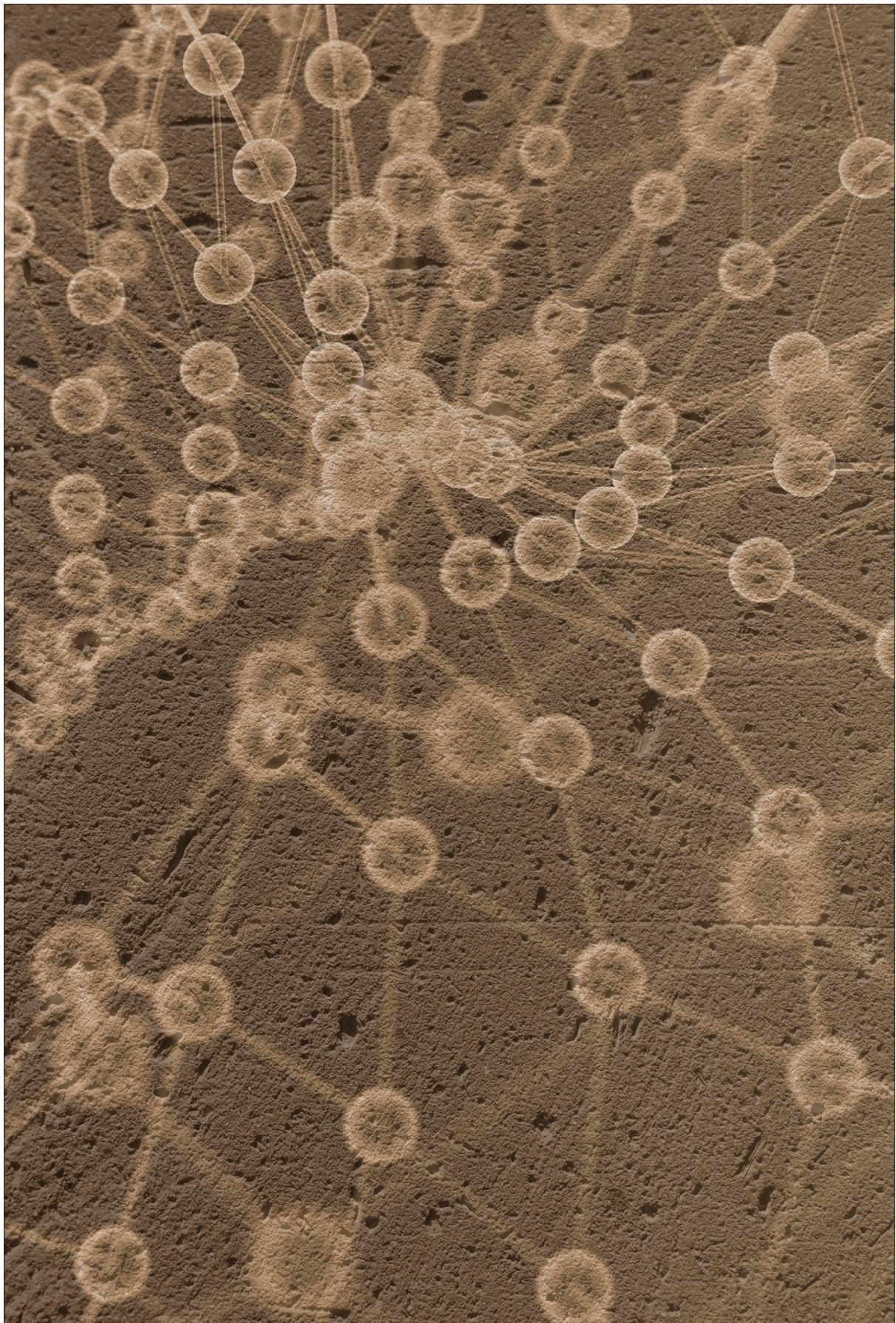


Fig. 4.0.1 "Los geopolímeros, son materiales compuestos por cadenas o redes de moléculas minerales vinculadas con enlaces covalentes"-
Geopolymer Institute (créditos en apartado: Lista de figuras, imágenes y créditos).

2.2 GEOPOLIMERIZACIÓN

CONTENIDO:

- 2.2.1 Antecedentes
- 2.2.2 Definición general
- 2.2.3 Reseña histórica
- 2.2.4 Terminología y estructura
- 2.2.5 Fuente de aluminosilicatos
 - 2.2.5.1 Productos y subproductos industriales
 - 2.2.5.2 Aluminosilicatos Naturales
- 2.2.6 Activadores alcalinos
 - 2.2.6.1 Hidróxido de Sodio (NaOH)
 - 2.2.6.2 Hidróxido de Potasio (KOH)
 - 2.2.6.3 Soluciones de silicatos alcalinos
 - 2.2.6.4 Silicato de sodio (Na_2SiO_3)
 - 2.2.6.5 Otros activadores alcalinos
- 2.2.7 El proceso de síntesis de geopolímeros
 - 2.2.7.1 Primera etapa. (a) Disolución
 - 2.2.7.2 Segunda etapa. (b) Polimerización
 - 2.2.7.3 Tercera Etapa. (c) Cristalización
- 2.2.8 Otros factores implicados
 - 2.2.8.1 El agua
 - 2.2.8.2 Los materiales de relleno
 - 2.2.8.3 El proceso de curado
- 2.2.9 Impacto medioambiental
- 2.2.10 Interés científico en geopolímeros
- 2.2.11 Uso de geopolímeros en la construcción
 - 2.2.11.1 Uso de cementos alcalinos
 - 2.2.11.2 Uso de geopolímeros

2.2.1 ANTECEDENTES

Al igual que el cemento y sus derivados, muchos materiales no sostenibles heredados del siglo pasado continúan utilizándose masivamente. La arquitectura y la construcción, antes y durante gran parte del siglo XX, no consideraban seriamente los efectos medioambientales colaterales producto de la fabricación y uso de materiales, pero hoy, la realidad ambiental ha provocado un cambio de mentalidad y constituye uno de los temas más relevantes en todos los campos de investigación y producción.

En este contexto, los denominados cementos alcalinos, polímeros inorgánicos, geopolímeros,

etc. se presentan como materiales de construcción energéticamente eficientes en comparación con materiales que poseen gran cantidad de energía incorporada (Fig. 4.1.1, Fig. 4.1.2 y Fig. 4.1.3).

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos que forman parte de una amplia gama de materiales cuyas propiedades y usos son investigados por diversas disciplinas como química inorgánica moderna, físico química, química de coloides, mineralogía, geología, y diferentes tipos de ingenierías [1].

El término geopolímero fue acuñado por el científico *Joseph Davidovits* y empezó a utilizarse en la

1 Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère. p.04.



Fig. 4.1.1 Pieza estructural prefabricada de geopolímero a base de ceniza volante. *Queensland's Global Change Institute (GCI) University - Australia* (2013).

década de 1970 [2]. El prefijo "Geo" simboliza los aluminosilicatos inorgánicos basados en materiales geológicos que reaccionan con una solución

2 Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. CRC Press, Woodhead Publishing, Great Abington, Cambridge, UK. p. 01. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1533/9781845696382>.

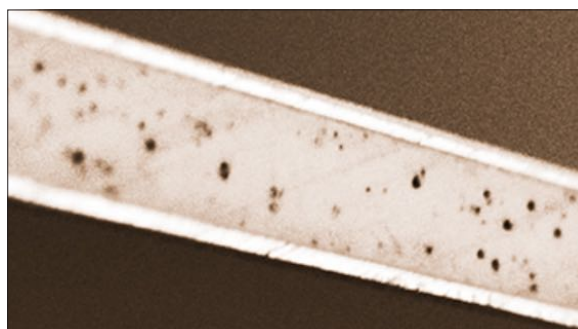


Fig. 4.1.2 Paneles resistentes al fuego a base de geopolímeros (*Nu-core® A2FR*).



Fig. 4.1.3 Diferentes geopolímeros sintetizados a partir de diferentes precursores de aluminosilicatos.

alcalina para formar un aglutinante a través de una reacción de policondensación [3]. Hay que tener presente que es posible sintetizar geopolímeros en un medio ácido, por ejemplo ácido fosfórico [4], pero este estudio está únicamente enfocado en geopolímeros fabricados a partir de medios alcalinos.

La policondensación o polimerización por condensación es un proceso de polimerización donde distintas sustancias reaccionan para crear uno o más monómeros, los cuales se unirán entre sí para formar un dímero, que por reacción con otros monómeros o dímeros (o trímeros, o tetrámeros...) darán lugar al correspondiente polímero [5].

Las aplicaciones dadas a los geopolímeros incluyen: materiales resistentes al fuego, aislantes térmicos, materiales de construcción 'low-tech', baldosas cerámicas de baja energía incorporada, artículos refractarios, cementos y hormigones, materiales 'high-tech' para piezas de aeronaves y automóviles, sistemas de resinas de alta tecnología, etc. [6]. Los geopolímeros producidos hasta la fecha han sido utilizados y probados en la construcción de vías, elementos estructurales de edificios, paneles aislantes, piezas decorativas, etc.

Los geopolímeros son materiales relativamente nuevos en la arquitectura y pueden ser utilizados como remplazo de materiales de construcción energéticamente costosos. A continuación se expone el estado de la cuestión.

2.2.2 DEFINICIÓN GENERAL

La geopolimerización es una síntesis mediante una reacción que integra químicamente minerales [7] en cadenas o redes de moléculas vinculadas con enlaces covalentes [8]. Los geopolímeros son sintetizados mediante la reacción química de aluminosilicatos sólidos con soluciones de silicatos o hidróxidos de metales alcalinos [9] (o un medio ácido, caso que no analizaremos en este estudio).

El proceso de geopolimerización comienza con un polvo de aluminosilicato o una mezcla de diferentes materiales ricos en SiO₂ (Sílice u óxido de silicio) y Al₂O₃ (Alúmina u óxido de aluminio). Estos materiales "base" o "precursores" se mezclan con una solución alcalina, por lo general, compuesta de un hidróxido de metal alcalino como por ejemplo hidróxido de sodio. El alto pH de la solución de activación disuelve la fuente de aluminosilicato sólido y la pasta resultante se somete a una serie de reacciones químicas que dan lugar a un material, que endurecido, presenta resistencia mecánica comparable o superior a la de los materiales a base de cemento Portland [10].

Los geopolímeros representan una gran familia de materiales que generalmente poseen propiedades destacables: son resistentes al calor y al fuego (estables hasta 1200°C), resistentes a los disolventes orgánicos y ácidos (en general a la corrosión), son impermeables, resistentes al agua, tienen excelentes propiedades mecánicas, son materiales no tóxicos y, en comparación al

3 Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). *Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review*. Progress in Materials Science, 83, 595–629. p.596. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>.

4 Louati, S., Baklouti, S., & Samet, B. (2016). *Acid based geopolymerization kinetics: Effect of clay particle size*. Applied Clay Science, 132–133, 571–578. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.007>.

5 Alban, Fred (1999). *Materiales poliméricos* (2ª edición). Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle. (n/d).

6 Davidovits, J. (2015). *Op cit.*, pp.04-05.

7 Hermann E, Kunze C, Gatzweiler R, Kiebig G, Davitovits J (1999) In: *Proceedings of Geopolymers*. p. 211.

8 *What is a geopolymer?* (5 Abril 2006, actualizado: Agosto 17, 2012). Recuperado en octubre 2017 de: <https://www.geopolymer.org/science/introduction/>.

9 Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). *Geopolymer technology: The current state of the art*. Journal of Materials Science, 42(9), 2917–2933. p.2917. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.

10 Borges, P. H. R., Bantia, N., Alcamand, H. A., Vasconcelos, W. L., & Nunes, E. H. M. (2016). *Performance of blended metakaolin/blastfurnace slag alkali-activated mortars*. Cement and Concrete Composites, 71, 42–52. p.42. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.008>.

cemento tradicional, producen bajas emisiones de CO₂ ya que pueden ser hechos a partir de una gran variedad de aluminosilicatos o incluso desperdicios o subproductos tales como cenizas volantes (Fig.4.2.1), escorias y desechos de la minería [11].

En la actualidad el término “geopolímero” es ampliamente utilizado para referirse a los materiales producto de la síntesis entre aluminosilicatos y soluciones alcalinas. También se utilizan otros términos como: aglutinante alcalinamente activado, aluminosilicato cristalizado a baja temperatura, cemento alcalinamente activado, geocemento, cerámica alcalinamente unida, concreto de polímero inorgánico, hidrocerámica, etc. [12]. Este fenómeno genera confusión para quien se inicia en el estudio de los “geopolímeros”, fracciona la investigación y es aprovechado para favorecer los intereses de las grandes empresas internacionales

del cemento *Portland*, que no están ni han estado interesadas en promover el desarrollo de los aglutinantes alternativos como materiales de construcción [13].

En este contexto, *Davidovits* sostiene que es erróneo definir a todos los materiales alcalinamente activados como geopolímeros debido a su sistema estructural molecular. Otros autores [14] sostienen que el término más apropiado para describir los geopolímeros o materiales producto de la activación alcalina de aluminosilicatos es “polímeros inorgánicos”, pues durante la reacción se forma una red tridimensional de silicatos en donde la columna vertebral consiste en enlaces Si-O y Al-O. *Provis y van Deventer*, en su publicación titulada “*Alkali Activated Materials*”, mencionan que los materiales alcalinamente activados hacen referencia a una extensa familia que abarca cualquier sistema

11 Zhang, G., He, J., & Gambrell, R. P. (2010). *Synthesis, Characterization, and Mechanical Properties of Red Mud-Based Geopolymers and Mechanical Properties of Red Mud – Based Geopolymers*. Journal of the Transportation Research Board, (December). p. 02. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.3141/2167-01>.

12 Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). *op. cit.* pp. 2917-2918.

13 Palomo, A., Krivenko, P., Kavalerova, E., & Maltseva, O. (2014). *A review on alkaline activation : new analytical perspectives*. *Materiales de Construcción*, 64(31). p.02.

14 Esaifan, M., Rahier, H., Barhoum, A., Khoury, H., Hourani, M., & Wastiels, J. (2015). *Development of inorganic polymer by alkali-activation of untreated kaolinitic clay: Reaction stoichiometry, strength and dimensional stability*. *Construction and Building Materials*, 91, 251–259. p.251. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.034>.



Fig. 4.2.1 Pieza estructural prefabricada de geopolímero a base de ceniza volante - Queensland's Global Change Institute (GCI) University - Australia (2013).

aglutinante obtenido por la reacción producida por fuente alcalina metálica (sólida o disuelta) sobre un precursor sólido que contenga silicato [15]. Este sólido precursor puede ser un silicato de calcio tal como sucede en la activación alcalina de los *clinkers* más convencionales o un precursor más rico en aluminosilicatos tal como una escoria metalúrgica, puzolana natural o ceniza volante. Según *Provis y van Deventer* los geopolímeros son un subconjunto de los materiales alcalinamente activados, con altas concentraciones de aluminio (Al) y bajas concentraciones de calcio (Ca) (Fig. 4.2.2).

En general se señala que los geopolímeros son similares a las zeolitas en la composición química, pero revelan una microestructura amorfa - semi cristalina. Se forman mediante la co-polimerización de especies de aluminosilicatos individuales que se originan a partir de la disolución de los materiales precursores que contienen silicio y aluminio a un *pH* alto, en presencia de silicatos de metales alcalinos solubles [16].

En este trabajo, el término geopolimerización se ha utilizado para hacer referencia a la reacción química que permite la formación de estructuras macro moleculares o poliméricas entre "aluminosilicatos base" y "activadores alcalinos". Por tanto, el término geopolímero se considera sinónimo de polímero inorgánico.

2.2.3 RESEÑA HISTÓRICA

En las últimas décadas se han intensificado los estudios sobre "cementos alcalinos" utilizados en construcciones de la antigüedad. Científicos, ingenieros e historiadores debaten sobre la composición de morteros utilizados en culturas antiguas tales como la egipcia, la griega y la romana. Hay gran interés en la composición y en la comparación de los materiales cementantes antiguos que han resistido largos períodos de tiempo, como por ejemplo, los hormigones romanos, que se han mantenido en servicio durante un período de más de 2000 años, incluyendo entornos en inmersión en agua de mar, mientras que otros, entre ellos los del Panteón de Roma, han resistido actividad sísmica significativa. La composición mineralógica de los cementos antiguos no es la misma que la de los cementos Portland; los antiguos aglutinantes tienden a ser más bajos en Ca y más ricos en álcalis, Si y Al [17].

En este contexto, la conexión entre "geopolímeros" y la construcción de las pirámides de Egipto ha sido el postulado más destacado, promovido por *J. Davidovits* [18], quien presentó una serie de teorías detalladas que sugieren que muchos de los grandes bloques de construcción que conforman las pirámides fueron hechos mediante técnicas de vertido en el lugar, utilizando química semejante a la de los geopolímeros.

15 Provis, J. L.; Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials RILEM State-of-the-Art Report*, TC 224-AAM. (RILEM, Ed.) (Vol. 13). Springer. p. 8. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>.

16 Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). *The geopolimerisation of alumino-silicate minerals*. Mineral Processing. p. 247.

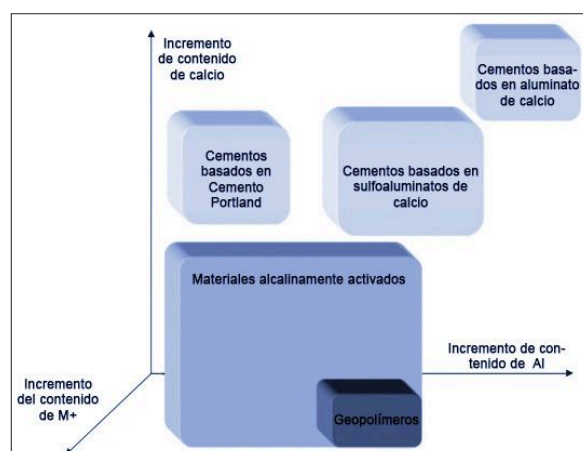


Fig. 4.2.2 Morteros alcalinamente activados, comparados con cemento Portland y ligante de sulfoaluminatos de calcio. El sombreado indica contenido alcalino aproximado; el sombreado más oscuro corresponde a concentraciones más altas de Na y/o K.

17 Glukhovskiy, V.D.: *Ancient, modern and future concretes*. In: Krivenko, P.V. (ed.) *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine, vol. 1, pp. 1-9. VIPOL Stock Company (1994)p.32.

18 Davidovits, J. and Davidovits, F.: *The Pyramids: An Enigma Solved*. 2nd Revised Ed. Éditions J. Davidovits, Saint-Quentin, France (2001).

Las investigaciones científicas realizadas hasta la fecha no han sido capaces de refutar o probar totalmente estas teorías, sin embargo, se han hecho análisis que corroboran en parte lo sostenido por Davidovits [19].

De cualquier forma, los primeros experimentos científicos (registrados) en donde se utilizaron bases o álcalis para producir "cementos" datan de inicios del siglo XX. La reacción de una fuerte solución alcalina con un precursor sólido de alúmina y sílice para formar un material sólido comparable al cemento *Portland* endurecido fue patentada por primera vez en 1908 por el químico e ingeniero alemán H. Kühl [20], quién posteriormente publicó una investigación sobre la fijación de la escoria mezclada con soluciones de cloruro de potasio (1930). Más adelante, L. Chassevent (1937) y R. Ferret (1939), señalaron la necesidad de estudiar las escorias como componentes del cemento [21].

En 1940, O. A. Purdon publicó los resultados del primer estudio de laboratorio sobre los cementos a base de escoria y cal en ausencia de *clinker Portland* [22]. Probó más de 30 diferentes escorias de alto horno activadas por soluciones de NaOH (Hidróxido de sodio) así como mediante combinaciones de Ca(OH)₂ (Hidróxido de calcio) y diferentes sales de sodio, logrando resistencias finales comparables a las de los cementos *Portland*. También notó un incremento en la resistencia a la tracción de los cementos de escoria alcalinamente activados en comparación con los cementos *Portland* de similar resistencia a la compresión, así como la baja solubilidad del ligante endurecido y

el poco desprendimiento de calor.

En los siguientes años, la investigación en tecnologías de activación alcalina se trasladó hacia la antigua Unión Soviética y China, que experimentaban escasez de cemento y necesitaban desarrollar materiales alternativos. El trabajo en la antigua Unión Soviética, fue iniciado por Viktor Glukhovsky en el *Instituto de Kiev*. Glukhovsky fue el pionero en investigar los aglutinantes utilizados en las antiguas construcciones romanas y egipcias. Llegó a concluir que estas estaban compuestas por aluminosilicatos de calcio hidratados similares a los del cemento *Portland*, con fases cristalinas de analcima, una roca natural que explicaba la durabilidad de los aglutinantes. Sobre la base de estas investigaciones, en 1957, Glukhovsky analizó por primera vez la posibilidad de preparar materiales cementantes libres de calcio y desarrolló un nuevo tipo de ligante que denominó "suelo-cemento", usando arcillas y soluciones alcalinas metálicas [23].

En la década de 1950, Glukhovsky propuso un mecanismo general para la activación alcalina de materiales compuestos principalmente de sílice y alúmina reactiva. Dependiendo de las composiciones de los materiales de partida, estos aglutinantes podían dividirse en dos grupos: los sistemas de unión alcalinos Me₂O-Me₂O₃-SiO₂-H₂O y sistemas alcalinos de unión alcalino-térreo Me₂O-MeO-Me₂O₃-SiO₂-H₂O, donde Me es un metal de ion alcalino. Basándose en estas observaciones, combinó aluminosilicatos, tales como diversos tipos de escorias y arcillas con soluciones alcalinas de desecho industrial, para formar una familia de ligantes de cemento alternativo [24].

En los años setenta y ochenta, Glukhovsky tomó la iniciativa de sacar a la luz varias publicaciones dedicadas exclusivamente a aglutinantes y hormigones de escorias alcalinamente activadas, realizando importantes aportes sobre las

19 Barsoum, M.W., Ganguly, A. and Hug, G.: *Microstructural evidence of reconstituted limestone blocks in the Great Pyramids of Egypt*. J. Am. Ceram. Soc. 89(12), 3788-3796 (2006).

20 Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials* (Vol. 13). p. 36. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>.

21 Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). *Alkali-activated binders: A review. Part I. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. Construction and Building Materials*, 22(7), 1305-1314. p.02. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>.

22 Palomo, A., Krivenko, P., Kavalerova, E., & Maltseva, O. (2014). *op. cit.* p. 5.

23 Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). *op. cit.* pp.02-03.

24 Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). *op. cit.* p. 2919.

propiedades y usos de estos materiales [25].

En la década de los setenta, gracias a investigaciones realizadas por el científico e ingeniero francés *Joseph Davidovits*, se dieron importantes avances en cuanto a formulaciones para la creación de sustancias poliméricas inorgánicas a base de metacaolín. *Davidovits*

patentó varias de estas formulaciones y en el año 1978 acuñó el término “geopolímero” [26].

Al final del siglo XX el estudio de los geopolímeros se materializó en varias publicaciones. En lo que va del siglo XXI, los estudios realizados han aumentado pero siguen siendo escasos en comparación a la dedicación que se da a materiales como el

25 Pacheco-Torgal, F. (2015). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. United Kingdom: Woodhead Pub. p. 02.

26 Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). *op. cit.* p. 03.

LISTA DE EVENTOS IMPORTANTES EN LA HISTORIA DE LOS MATERIALES ALCALINAMENTE ACTIVADOS Y GEOPOLÍMEROS			LISTA DE EVENTOS IMPORTANTES EN LA HISTORIA DE LOS MATERIALES ALCALINAMENTE ACTIVADOS Y GEOPOLÍMEROS		
1908	H. Kühl	Primera patente de un "cemento alcalino". Investigación y publicación sobre el uso de álcalis en cementos 1930.	1993	Roy y Malek	Cemento de escoria
1937	L. Chassevent	Determinan que es necesario profundizar en la investigación del uso de escorias en el cemento.	1994	V. D. Glukhovskiy	Hormigones antiguos, modernos y futuros.
1939	R. Feret	Investigación del uso de escorias en la fabricación de cemento	1994	Krivenko	Cementos alcalinos
1940	A. O. Purdon	Investigación acerca de la acción de los álcalis sobre escorias de alto horno.	1995	Wang y Scrivener	Microestructura de escorias y de la activación alcalina
1959	V. D. Glukhovskiy	Genera las bases teóricas de los cementos alcalinos. Acuña el término "cementos alcalinos" (1965)	1996	Shi	Resistencia a compresión, estructura del poro y permeabilidad de escorias alcalinamente activadas.
1978	J. Davidovits	Acuña el término "geopolímero". Realiza importantes mejoras en la formulación química de compuestos a base de metacaolín y otros aluminosilicatos.	1997	FernándezJiménez y Puertas	Estudio de cinética de los cementos de escorias alcalinamente activadas
1979	Malinowski	Caracterización de acueductos antiguos	1998	Katz	Microestructura de ceniza volante alcalinamente activada
1983	Forss	F-cement (escoria - álcali - super plastificante)	1999	J. Davidovits	Química de los sistemas de geopolímeros, tecnología.
1984	Langton y Roy	Caracterización de materiales de edificios antiguos	1999	Roy	Oportunidades y desafíos de los cementos alcalinamente activados.
1985	J. Davidovits y Sawyer	Patente del cemento "Pyrament"	1999	Palomo	Ceniza volante alcalinamente activada, un cemento para el futuro
1986	Krivenko	Dsc tesis, $R_2O-RO-SiO_2-H_2O$	2000	Gong and Yang	Lodos rojos - cemento de escoria alcalinamente activado
1986	Malolepsy and Petri	Activación de escorias sintéticas	2000	Puertas	Ceniza volante - cemento de escoria alcalinamente activado
1986	Malek	Cemento de escoria con bajos niveles de residuos radiactivos	2002	Bakharev	Concreto de escorias alcalinamente activado
1987	J. Davidovits	Comparación entre concretos modernos y antiguos	2003	Palomo y Palacios	Inmovilización de residuos peligrosos
1989	Deja and Malolepsy	Resistencia frente a los cloruros	2004	Gruzcek	Formación de Zeolitas
1989	Kaushal	Formas de curado adiabático de mezclas alcalinas de desperdicios nucleares	2006	Sun	"Sialite technology"
1989	Roy y Langton	Hormigones antiguos análogos	2007	Duxson	Tecnología de los geopolímeros: Estado actual de la técnica
1989	Majundar	Activación de escoria - C12A7	2008	Hajimohammadi	Una-parte geopolímero
1989	Talling and Brandstetr	Escoria alcalinamente activada	2009	Provis and van Deventer	Geopolímeros: estructura, procedimiento, propiedades y aplicaciones industriales.
1990	Wu	Activación de cemento de escoria	2014	Provis and van Deventer	Reporte del estado del arte de los materiales alcalinamente activados
1991	Roy	Fraguado rápido de cementos activados alcalinamente	2015	J. Davidovits	Geopolímeros, química y aplicaciones
1992	Roy y Silsbee	Cementos alcalinamente activados: visión general	2015	Pacheco-Torgal	Manual de cementos, morteros y concretos alcalinamente activados

Fig. 4.3.1 Eventos destacados en la historia de materiales alcalinamente activados hasta 2015.

hormigón [27]. En la tabla expuesta (Fig. 4.3.1) se presenta una lista de eventos y publicaciones importantes en el desarrollo histórico del estado del arte de materiales alcalinamente activados y geopolímeros.

2.2.4 TERMINOLOGÍA Y ESTRUCTURA

De acuerdo a las diferentes tipologías estructurales de los geopolímeros existen terminologías que pueden variar de un autor a otro. Las terminologías sirven para designar y diferenciar los diferentes tipos de geopolímeros y la proporción de sus compuestos.

Según la terminología propuesta por Davidovits [28] y utilizada por la mayor parte de autores [29], los aluminosilicatos geopoliméricos se agrupan en familias clasificadas por sus relaciones Si/Al (1, 2, 3) (Fig.4.4.1), a saber en:

Si:Al = 1
Sialato, poli (sialato)
(-Si-O-Al-O-)

Si:Al = 2
Sialato - Siloxo, poli (sialato - siloxo)
(-Si-O-Al-O-Si-O-)

Si:Al = 3
Sialato - Disiloxo, poli (sialato - disiloxo)
(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)

Si:Al > 3
Enlaces sialato

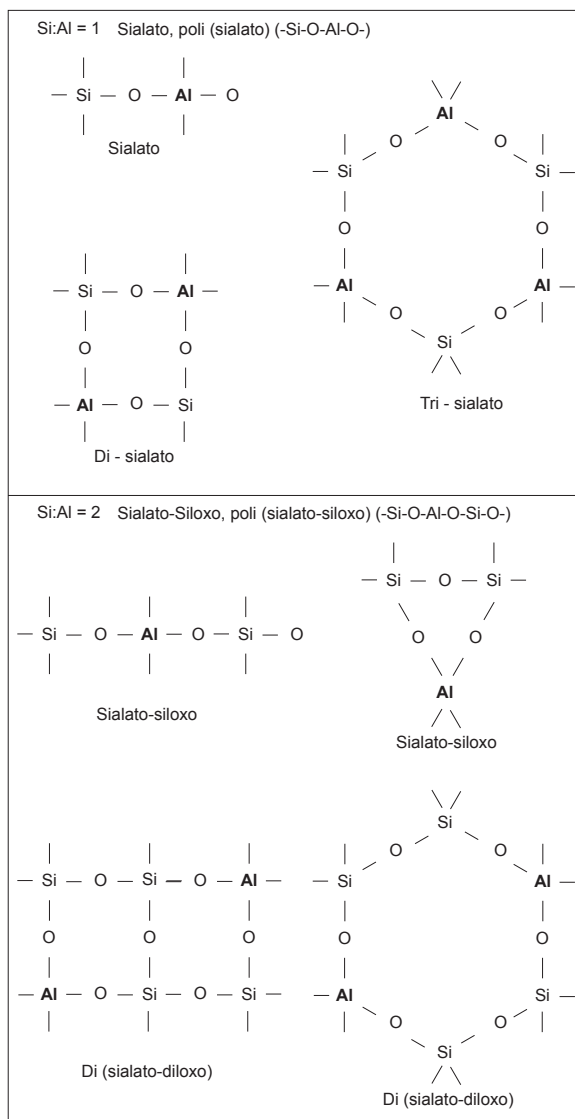


Fig. 4.4.1 Diferentes sistemas de geopolímeros basados en el número de unidades siloxo Si-O (según Davidovits).

27 Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2008). *Activación alcalina de cenizas volantes. Relación entre el desarrollo mecánico resistente y la composición química de la ceniza*. *Materiales de Construcción*, 58(291), 35–52. . p. 36. Recuperado en octubre 2017 de: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/101/140> .

28 Davidovits, J. (1991). *Geopolymers - Inorganic polymeric new materials*. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656. p.1. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/BF01912193>.

29 Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). *Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review*. *Journal of Materials Science*, 42(3), 729–746. p.731. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>

Sialato es una abreviación para silicio - oxo - aluminato. La cadena sialato contiene SiO_4 y AlO_4 unidos compartiendo todos los oxígenos. Los iones positivos (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ , H_3O^+) deben estar presentes en las cavidades del marco para equilibrar la carga negativa de Al^{3+} en la coordinación de pliegues IV [30].

La fórmula empírica de los geopolímeros poli(sialatos) está dada por:



Donde M es un catión tal como K^+ , Na^+ o Ca_2^+ ; N es el grado de policondensación; Z es 1, 2, 3 y w es la cantidad de agua de unión [31]. Algunas estructuras relacionadas se muestran en la figura (Fig. 4.4.2).

2.2.5 FUENTE DE ALUMINOSILICATOS

En la formación y propiedades de un geopolímero influyen significativamente la composición de la materia prima o fuente de aluminosilicatos, así como otros factores como las condiciones de reacción, la concentración de álcali, la temperatura de curado, el tiempo de curado, la relación agua/sólido y el pH.

Cualquier compuesto que sea fuente de sílice y alúmina que se disuelva fácilmente en una solución alcalina, actúa como materia prima o sustancia base (material precursor) de geopolímeros y por lo tanto es susceptible de geopolimerización [32].

Los "materiales alcalinamente activados", según la materia prima o material base, podrían dividirse en dos grupos. En el primer grupo la materia prima o sustancia base son silicatos hidratados de calcio y magnesio, dentro de este grupo existen varios tipos de materias primas que han servido para el desarrollo de morteros y cerámicas a nivel industrial. En el segundo grupo se encuentran los geopolímeros. La materia prima o sustancia base son aluminosilicatos. A su vez, se puede decir que los geopolímeros se subdividen en materiales a base de precursores de aluminosilicatos altamente reactivos (como cenizas volantes, escoria, cenizas de cáscara de arroz, etc.) y materiales a base de

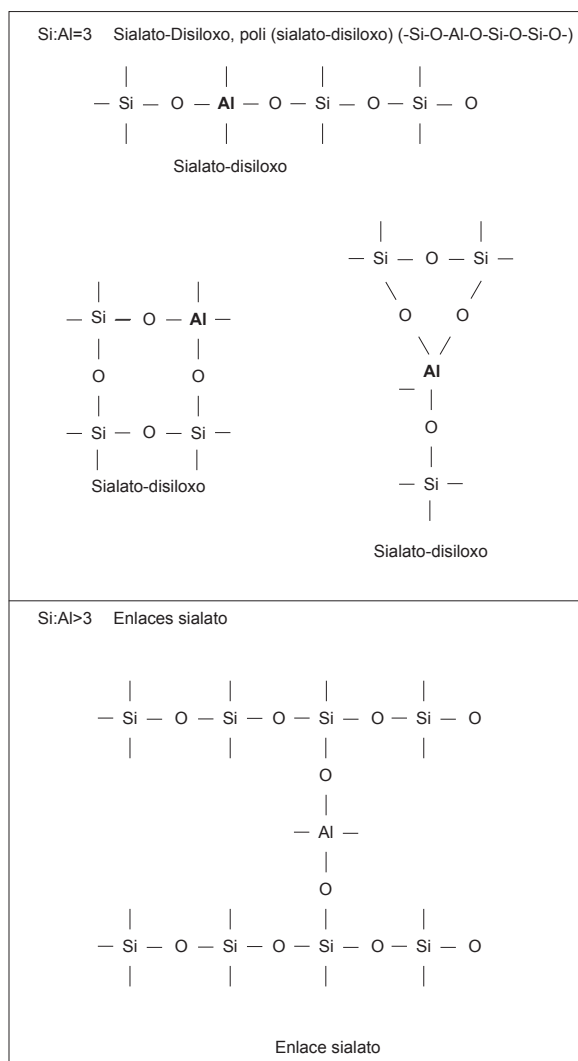


Fig. 4.4.2 Diferentes sistemas de geopolímeros basados en el número de unidades siloxo Si-O (según Davidovits).

precursores de aluminosilicatos menos reactivos (arcillas como caolín, bentonitas, etc.).

Los aluminosilicatos son minerales que contienen óxido de aluminio (Al_2O_3) y sílice (SiO_2): el feldespato, las cloritas, minerales de la arcilla, algunas puzolanas, etc. Los aluminosilicatos forman parte de los silicatos con reemplazo de los iones Si^{4+} por los de Al^{3+} , los cuales, debido a la diferencia de cargas positivas, requieren cationes adicionales con la finalidad de poder alcanzar la neutralidad eléctrica. En función de las particularidades en las composiciones de la materia prima se pueden obtener diferentes resultados.

31 Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). *op. cit.* p.597.

32 Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). *op. cit.* p.730.

2.2.5.1 Productos y subproductos Industriales

A diferencia de los aluminosilicatos de origen natural existen subproductos industriales que contienen altos porcentajes de alúmina o sílice, tal es el caso de las cenizas volantes (Fig. 4.5.1), que son los residuos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas; o el caso de las escorias de alto horno, que son subproductos de la industria metalúrgica.

El metacaolín (Fig. 4.5.2) también posee altos niveles de alúmina y sílice, se deriva de la caolinita y se forma al calcinar el caolín a temperaturas aproximadas a 550°C produciéndose una transformación de su estructura cristalina.

Los principales precursores utilizados en la producción general de materiales alcalinamente activados y concretamente de geopolímeros, por ser fuentes ricas en sílice y alúmina, son: cenizas volantes y escorias de alto horno. Pero, como es sabido, actualmente las cenizas volantes y las escorias de alto horno son productos de gran demanda para la producción de cemento Portland [33]. Muy poco se ha investigado sobre la utilización de cenizas de cáscara de arroz, cenizas volcánicas, humo de sílice y otros residuos y subproductos.

En el caso de geopolímeros a base de cenizas volantes varios estudios han demostrado que las cenizas que mejor se desenvuelven bajo activación alcalina son las que tienen un alto contenido de reactivos SiO_2 y Al_2O_3 y cenizas con ratio "Si/Al reactivos" menores a 2.

Independientemente de la composición de la ceniza, la materia prima que mejor reacciona en tiempos de reacción cortos está constituida por una

fase rica en aluminio [34]. La cantidad absoluta de aluminio disponible y su liberación a través de la reacción alcalina, no sólo afecta a la resistencia final, sino a otras propiedades en estado húmedo y

34 Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). *The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1-3), 111-119. p118. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.015>.

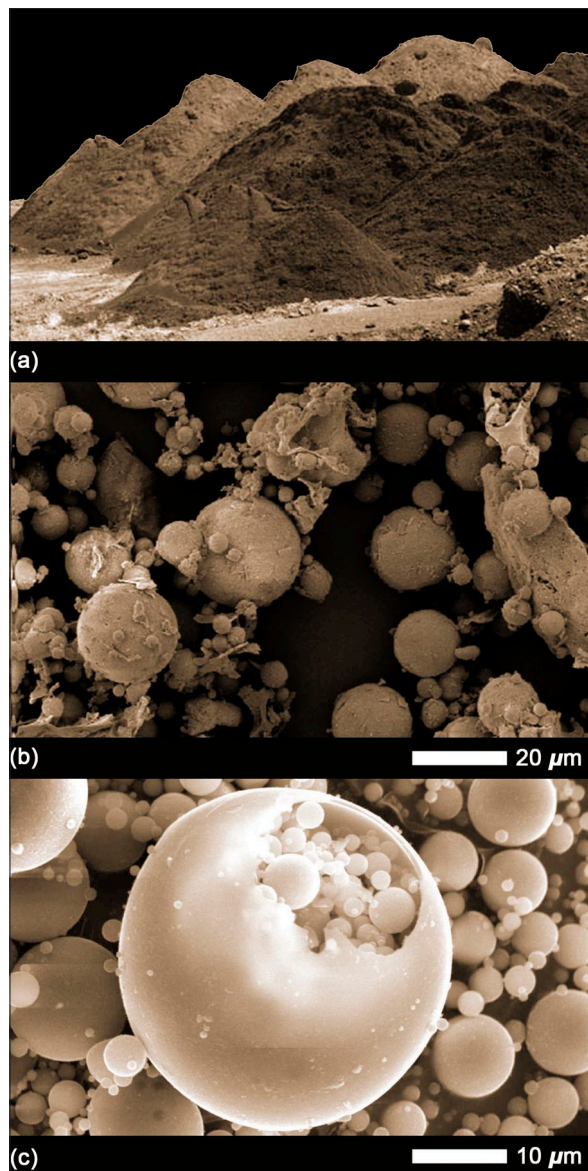


Fig. 4.5.1 (a) Imagen de cenizas volantes subproductos de la quema de carbón. (b) y (c) Imágenes SEM que permiten observar la forma esférica de las partículas que componen la ceniza volante.

33 Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD. 2011. *Supplementary cementitious materials*. Cem. Concr. Res. 41:1244-1256.

seco, que incluyen las características de fraguado, resistencia a la flexión, resistencia a los ácidos, microestructura y resistencia a la compresión.

La disponibilidad de silicio también es importante pero menos crítica, ya que en algunos casos, a través de la solución activadora puede compensarse por adición directa. Mediante la comprensión de la naturaleza y capacidad de disolución de aluminio de un material precursor se

podría predecir y controlar las propiedades de los geopolímeros resultantes de la activación alcalina de cenizas volantes [35].

A simple vista, muchas de las características macroscópicas de geopolímeros preparados a partir de diferentes fuentes de aluminosilicatos, pueden parecer similares pero su microestructura y propiedades físicas, mecánicas, químicas, y térmicas, varían dependiendo predominantemente de la materia prima de la que se derivan [36].

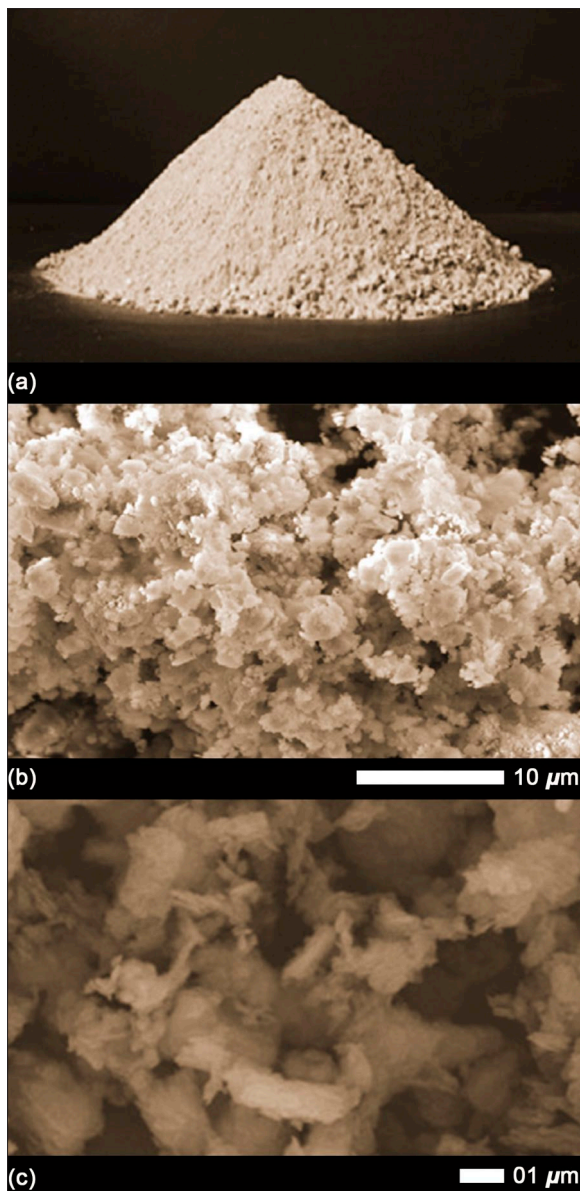


Fig. 4.5.2 Imagen de metacaolín (a). Imágenes SEM que permiten observar la forma semi amorfa de las partículas que componen el metacaolín (b) y (c).

2.2.5.2 Aluminosilicatos Naturales

Son pocas las investigaciones que analizan el comportamiento de la materia prima de origen geológico en estado natural, como es el caso de las arcillas sin calcinar.

Pese a la disponibilidad de datos sobre la solubilidad de algunos minerales naturales en medio alcalino, existe un conocimiento limitado sobre la propensión exacta de la mayoría de minerales Al-Si útiles para geopolimerización [37]. Por lo general la interrelación entre la mineralogía y la reactividad de los minerales individuales es compleja, razón por la cual las investigaciones en la mayoría de los casos, se centran en la geopolimerización de los materiales más estudiados o con más reactividad, como es el caso de los subproductos industriales que han pasado por alteraciones térmicas.

La activación alcalina de la mayoría de aluminosilicatos naturales comúnmente presenta baja reactividad en comparación a la activación alcalina de cenizas volantes o escorias, por ello, en ciertas ocasiones los aluminosilicatos naturales son mezclados con materiales adicionales para

35 Duxson, P., & Provis, J. L. (2008). *Designing precursors for geopolymer cements*. Journal of the American Ceramic Society, 91(12), 3864–3869. p.12. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02787>.

36 Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). *op. cit.* P. 2918.

37 Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). *op. cit.* p. 249.

alcanzar altas resistencias [38].

A más de desperdicios y subproductos, la caolinita y el metacaolín (Fig. 4.5.2) son aluminosilicatos relativamente accesibles que han sido usados en estudios previos como una fuente de Si y Al solubles para sintetizar geopolímeros. La cantidad

de disolución del Al de la caolinita es mayor que la de otros aluminosilicatos naturales comunes, sin embargo, si sólo se usa caolinita sin la presencia de otros aluminosilicatos, se forma una estructura débil, de manera que la sinergia entre diferentes aluminosilicatos parece ser importante, pero es un aspecto que requiere investigaciones adicionales [39].

38 Muñoz, J. F., Easton, T., & Dahmen, J. (2015). *Using alkali-activated natural aluminosilicate minerals to produce compressed masonry construction materials*. *Construction and Building Materials*, 95, 86–95. p.86. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.144>.

Algunos estudios señalan que la calcinación del caolín es necesaria para la disolución de la alúmina en soluciones alcalinas en estado fluido que lleven a la solidificación posterior de geopolímeros [40].

COMPOSICIÓN ELEMENTAL EN PORCENTAJE DE MASA DE VARIOS MINERALES ADECUADOS PARA GEOPOLIMERIZACIÓN, ORDENADOS EN CONTENIDO DECRECIENTE DE SiO ₂									
Tipo	Fuente	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	Fe ₂ O ₃ %	LOI %
Sílice	Cuarzo: Polvo de sílice	99,56	0,28	0,00	0,00	0,01	0,10		0,00
Sílice	Ceniza de cáscara de arroz	92,83	0,59	0,46	0,49	0,00	0,10		2,3
Sílice	Humo de sílice	89,00	0,40	0,20	1,70	0,20	1,20		1,40
Rocas	Toba volcánica	74,16	13,80	0,43	0,17	4,33	4,86	1,13	0,92
Arcillas caoliniticas	33.7% Caolinita, cuarzo, pirofilita.	70,04	19,59	0,35	0,26			0,37	4,72
Rocas	Toba volcánica ignimbria	60,08	19,98	3,30	0,60	3,08	8,55	3,32	0,52
Rocas	Lava lamproita	58,42	10,80	2,56	8,68	1,50	8,35	5,80	1,15
Ceniza volante	Ceniza volante - España	57,36	23,28	3,40	1,80	0,73	1,58	6,35	3,54
Arcillas	Illita	56,91	36,37	1,59	2,07	0,43	5,10	0,72	8,84
Arcillas caoliniticas	Chamota, caolinita calcinada 1100C °	56,06	36,09	0,10	0,20	0,20	2,10	1,60	0,20
Arcillas caoliniticas	Metacaolín-750, caolinita calcinada	54,96	41,09	0,10	0,20	0,20	2,10	0,60	0,83
Arcillas caoliniticas	78,5% Caolinita, cuarzo, moscovita.	54,5	29,4	0,20	0,20	0,10	0,20	1,40	11,00
Ceniza volante	Ceniza volante - Bélgica	52,66	8,68	10,31	1,22	0,82	1,98	8,67	5,50
Arcillas	Montmorillonita	51,14	19,76	1,62	3,22	0,11	0,04	0,83	22,51
Ceniza volante	Ceniza volante - España	50,30	27,05	2,81	1,79	0,74	3,60	7,43	4,91
Ceniza volante	Ceniza volante - Australia	50,00	28,00	3,50	1,30	0,20	0,70	12,00	2,00
Arcillas caoliniticas	93% Caolinita, moscovita, cuarzo	45,34	38,81	0,13	0,26	0,01	0,08	0,73	13,05
Rocas	Anortita	43,88	36,18	19,37		0,22	0,10	0,08	0,36
Arcillas caoliniticas	Anhidrita, cuarzo	34,87	10,38	27,50	1,79	0,83	2,06	4,82	
Escorias	Escoria metalúrgica - Bélgica	33,27	10,90	44,77	5,27	0,26	0,62	1,43	1,64
Escorias	Escoria metalúrgica - USA	32,83	11,59	41,43	0,03	0,28	0,41	1,58	1,30

Fig. 4.5.3 Lista de algunos minerales aptos para la geopolimerización con su respectivo contenido de Si₂O₂. (J. Davidovits)

Los minerales con mayor grado de disolución muestran una mejor resistencia a la compresión porque las moléculas sueltas se organizan de mejor forma en las nuevas redes poliméricas [41].

Existe interés en el estudio del comportamiento de materias primas naturales, en las que no se requieran grandes cantidades de energía previa para mejorar las características finales del material. En el siguiente capítulo se trata más a detalle el tema de geopolímeros de aluminosilicatos naturales de arcillas, y en la tabla en la Fig. 4.5.3 se señala la composición elemental de una serie de materias primas o sustancias base para la elaboración de geopolímeros según Davidovits.

39 Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). *op. cit.* pp. 252-253.

40 Weng, L., Sagoe-Crentsil, K., Brown, T., & Song, S. (2005). *Effects of aluminates on the formation of geopolymers*. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 117(2), 163–168. p.163. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.mseb.2004.11.008>.

41 Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). *op. cit.* p.260.

2.2.6 ACTIVADORES ALCALINOS

Para iniciar la reacción de geopolimerización de un aluminosilicato sólido se requiere su activación química mediante un componente alcalino (o ácido), generalmente hidróxidos o silicatos alcalinos de alto *pH* que formarán una red polímero inorgánica de álcali-aluminosilicatos [42]. Los átomos de silicio y aluminio reaccionan para formar moléculas químicas y estructuralmente comparables a las que construyen las rocas naturales. Las sales y/o hidróxidos de metales alcalinos son necesarios para la disolución de sílice y alúmina, pero también son necesarios para formar parte de las redes poliméricas [43].

El hidróxido de metal alcalino (OH^-), por ejemplo en NaOH , actúa como catalizador mientras los cationes metálicos, por ejemplo Si-Al , se incorporan en la matriz. Es así que la concentración del activador alcalino influye en las características de lixiviación y en la estabilidad final para formar un elemento estructural y equilibrar el marco negativo llevado por el aluminio tetraédrico [44]. El mecanismo inicial de reacción es impulsado por la capacidad de la solución alcalina para disolver el material base y liberar el silicio y el aluminio reactivo [45].

En cualquier caso, los activadores usualmente serán: hidróxidos alcalinos, silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos o cualquier sustancia soluble que pueda sustituir cationes del metal alcalino, elevar el *pH* de la mezcla de reacción y acelerar la disolución del precursor sólido.

Cuando la materia prima o material base se mezcla con soluciones alcalinas sus componentes

se disuelven en mayor o menor grado, independientemente del tipo de hidróxido. Pese a ello, es insuficiente para que las estructuras crezcan hasta formar redes bien cristalizadas y como resultado se forma una estructura microcristalina amorfa o semi-amorfa.

El nivel de *pH* de la solución activadora influye fuertemente en el rendimiento final del geopolímero. *Khale* y *Chaudhary* [46] informaron que la resistencia medida a partir de muestras de *pH* 14 era cinco veces mayor que las muestras formadas a partir de pastas de *pH* 12; concluyeron que un rango de *pH* de 13-14 es más adecuado para la formación de geopolímeros con mayores resistencias mecánicas.

V. Glukhovsky clasificó los activadores en seis grupos:

- (1) Álcalis, MOH .
- (2) Sales ácidas débiles, $\text{M}_2\text{CO}_3, \text{M}_2\text{SO}_3, \text{M}_3\text{PO}_4, \text{MF}$
- (3) Silicatos, $\text{M}_2\text{O} - n\text{SiO}_3$.
- (4) Aluminatos, $\text{M}_2\text{O} - n\text{Al}_2\text{O}_3$.
- (5) Aluminosilicatos, $\text{M}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$.
- (6) Sales ácidas fuertes, M_2SO_4 .

(donde *M* es un catión tal como K^+, Na^+ , etc.)

Soluciones de hidróxidos alcalinos.

Existen varios hidróxidos alcalinos utilizados para la activación de aluminosilicatos, cada uno presenta características y resultados particulares en la síntesis de geopolímeros. Los más usados son los hidróxidos alcalinos de sodio (NaOH) y/o potasio (KOH).

En este contexto la eflorescencia es un problema conocido en los geopolímeros activados con una concentración demasiado alta de soluciones de hidróxido, donde el exceso de álcali reacciona con el CO_2 atmosférico. De todos modos, en la mayoría de los casos, no es perjudicial para la integridad estructural del material [47].

42 Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2013). *Characterization of alkali activated kaolinitic clay*. Applied Clay Science, 75–76, 120–125. p.120. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.005>.

43 Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). *op. cit.* pp. 731-732.

44 Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). *op. cit.* p.732.

45 Review, A. L., Force, A. I. R., & Directorate, M. (2012). *Alkali-activated geopolymers: a literature review*. Air Force USA. Airbase Technologies Division, Air Force Research Laboratory. p.09.

46 Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). *op. cit.* p. 738.

47 Pacheco-Torgal, F. (2015). *op. cit.* pp. 462-483.

Otro factor a considerar es el aumento de temperatura en de la solución y los cuidados que deberan tomarse en cuenta en el manejo de los materiales precursores, sobre todo si las soluciones de hidróxido deben ser preparadas rutinariamente a partir de precursores sólidos.

2.2.6.1 Hidróxido de Sodio (NaOH)

El hidróxido de sodio o hidróxido sódico, también conocido como soda cáustica o sosa cáustica, es el activador más usado, siendo el más barato y disponible de los hidróxidos alcalinos.

Los cationes de sodio son más pequeños que los cationes de potasio y pueden migrar con mucho menos esfuerzo. Los geopolímeros activados con hidróxido de sodio desarrollan mayor cristalinidad mejorando así la estabilidad en ambientes agresivos de sulfatos y ácidos [48].

Las concentraciones más altas de NaOH promueven mayores resistencias en las primeras etapas de reacción, sin embargo, la resistencia de muestras envejecidas pueden comprometerse debido a un excesivo OH⁻ en la solución [49].

La alcalinidad es necesaria para la desintegración de aluminosilicatos fuertes (Fig.4.6.1). Por otra parte, Na⁺ sirve como el ion que contrarresta la carga negativa introducida por cada tetraedro AlO₄ formado [50].

2.2.6.2 Hidróxido de Potasio (KOH)

El hidróxido de potasio (también conocido como potasa cáustica) es un compuesto químico inorgánico de fórmula KOH. Al igual que el hidróxido de sodio (NaOH), el hidróxido de potasio es una base de uso común. Todos los minerales de Al-Si son en cierta medida solubles en solución alcalina concentrada, en general

con un mayor grado de disolución en NaOH que en KOH. También existen investigaciones sobre geopolimerización de aluminosilicatos que muestran mayores resistencias a la compresión después de la geopolimerización en KOH que en NaOH a pesar del mayor grado de disolución en

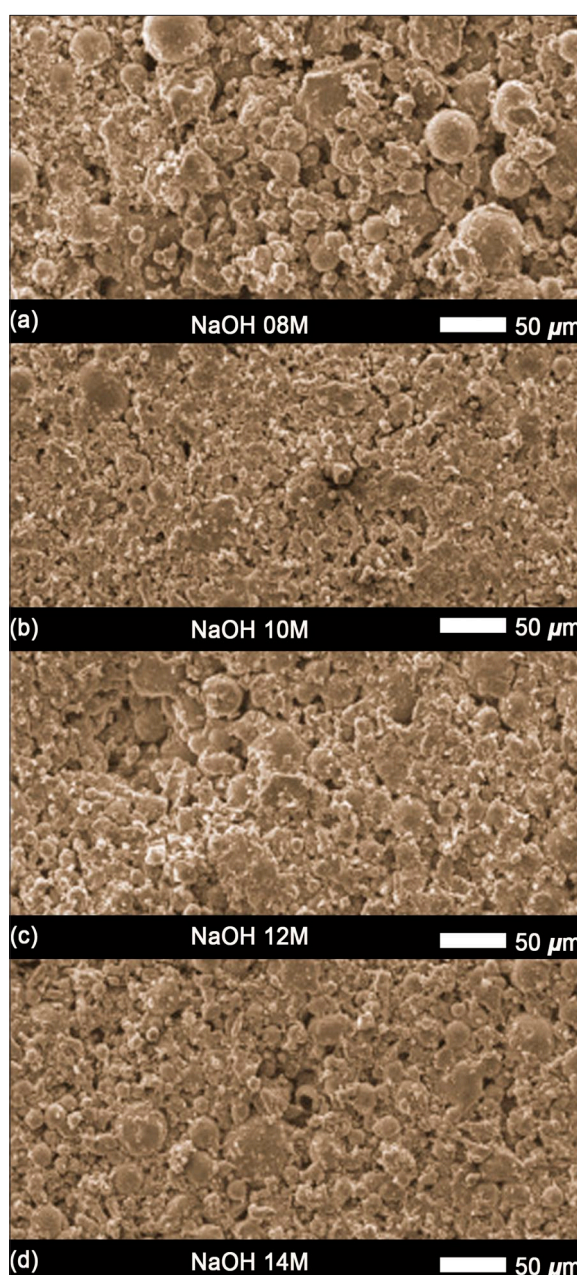


Fig. 4.6.1 Efecto del Hidróxido de Sodio (NaOH) sobre la ceniza de cáscara de arroz según la concentración.

48 Review, A. L., Force, A. I. R., & Directorate, M. (2012). *op. cit.* p.10.

49 *Ibid.*

50 Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2013). *op. cit.* p.122.

NaOH que en KOH (Fig.4.6.2) [51].

El hidróxido de potasio, posee un mayor potencial de ionización polimérica en solución, sin embargo, se ha demostrado que las concentraciones de KOH por encima de 10M disminuyen la resistencia debido a los excesivos iones de K^+ [52].

2.2.6.3 Soluciones de silicatos alcalinos

La química de la sílice es compleja y como tal, es poco entendida [53]. La viscosidad de las disoluciones de silicato de sodio disminuye notablemente con el aumento de la temperatura y la solubilidad de algunas fases de metasilicato de sodio comienzan a disminuir a temperatura elevada, lo que significa que el calentamiento no es una forma garantizada de asegurar o acelerar la disolución de precursores sólidos durante la preparación de una solución de activación de geopolímero [54].

2.2.6.4 Silicato de sodio (Na_2SiO_3)

El silicato de sodio o silicato sódico (nombre común del compuesto metasilicato de sodio), también conocido como vidrio soluble, es una sustancia inorgánica que se encuentra en soluciones acuosas y también en forma sólida.

Los silicatos de sodio se fabrican mediante la fusión de arena (SiO_2) con carbonato de sodio (Na_2CO_3) a temperaturas superiores a $1100^\circ C$ y disolución del producto con vapor de alta presión en un líquido semi-viscoso denominado vidrio soluble. Comúnmente se lo mezcla con NaOH o KOH como un agente fortalecedor para aumentar la alcalinidad y aumentar la resistencia general del de geopolímeros.

El vidrio soluble en polvo conduce a un menor rendimiento en comparación con la forma líquida. La propiedad más importante de este producto es su relación de masa de SiO_2 a Na_2O , que está comercialmente disponible en el rango de 1,5 a 3,2. Para obtener mejores resultados, se recomienda una solución de silicato con una proporción de

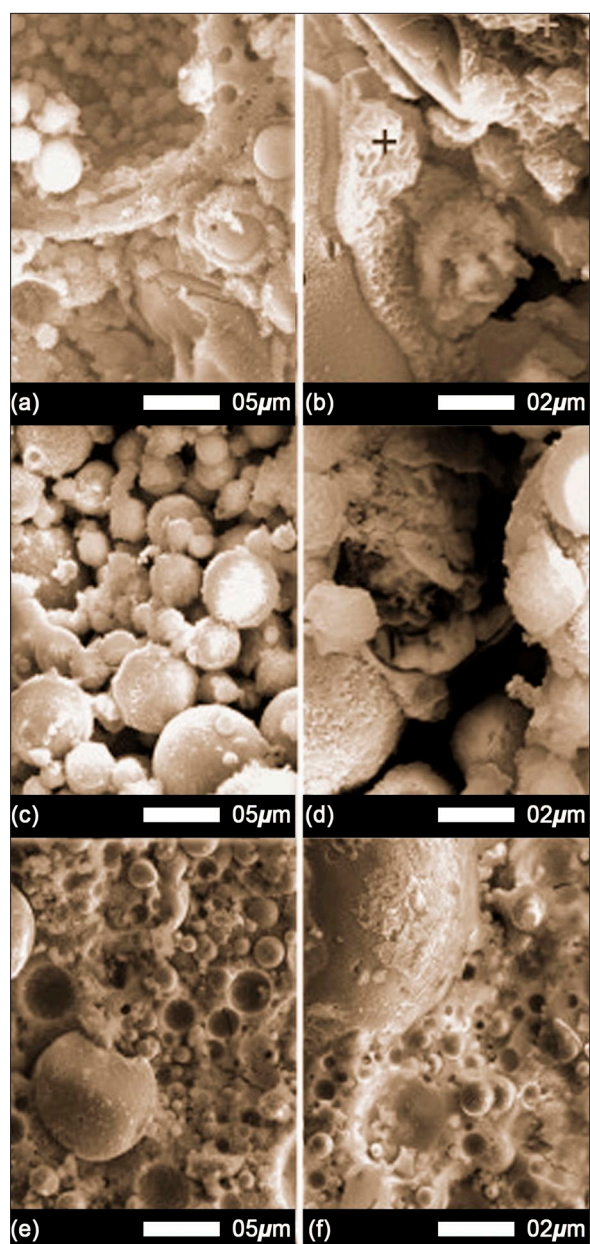


Fig. 4.6.2 Imágenes SEM de pastas de ceniza volante activadas usando: (a y b) 8M NaOH; (c y d) 8M KOH; (e) silicato de sodio ($Ms=2.0$) y (f) silicato de potasio ($Ms=2.0$).

51 Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). *op. cit.* pp. 247–266.

52 Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). *op. cit.* pp.729–746

53 Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *op. cit.* pp. 56–64.

54 *Ibidem.*

SiO₂ a Na₂O (en masa) de 2,0 mezclada con un hidróxido alcalino de 8-16M 24 horas antes del uso [55]. Los silicatos solubles reducen la saturación de los álcalis en la solución y promueven un mayor enlace inter partícula tanto con los ligantes geopolímeros como con el material agregado incluido. Existen investigaciones que han revelado que las soluciones activadoras que contienen poco o nada de silicatos solubles producen resistencias a compresión significativamente más débiles que las activadas con altas dosis de silicatos solubles [56].

Investigaciones adicionales demuestran que bajo temperaturas crecientes, los especímenes que contienen vidrio soluble disminuyen en fuerza mientras que aquellos que contienen sólo un activador alcalino (NaOH, KOH) producen mayores resistencias [57].

2.2.6.5 Otros activadores alcalinos

Existen otros activadores alcalinos, como por ejemplo hidróxido de rubidio (RbOH), que no se han estudiado en detalle en la geopolimerización debido principalmente a su costo y escasez. El hidróxido de cesio (CsOH), se ha usado en algunos casos en geopolimerización pero predominantemente en silicato en lugar de sistemas activados por hidróxido. Es menos raro que el rubidio, pero aún lo suficientemente exótico como para considerar improbable su uso comercial a gran escala en geopolímeros [58].

El activador alcalino más utilizado en varios estudios es una mezcla de un hidróxido metal-alcalino (NaOH o KOH) con una solución de silicato de metal-alcalino ($n\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$, o $n\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$). Existen pocos y aislados estudios de activadores

alcalinos alternativos a los antes mencionados [59], por tanto, serán de utilidad futuras investigaciones en este campo.

2.2.7 EL PROCESO DE SÍNTESIS DE GEOPOLÍMEROS

Los geopolímeros o polímeros inorgánicos no son únicamente el resultado de la activación química mediante un activador alcalino de un material base compuesto de aluminosilicatos. Sumada a esta corta definición se debe mencionar que el proceso de geopolimerización abarca diferentes etapas y variantes de síntesis y curado cuyas particularidades son determinantes en las características finales de los geopolímeros.

Dependiendo de la materia prima seleccionada y las condiciones de síntesis, los geopolímeros pueden presentar características de gran resistencia a compresión, baja retracción, fraguado rápido o lento, resistencia a los ácidos, resistencia al fuego y baja conductividad térmica. Sin embargo, estas propiedades no son inherentes a todas las formulaciones de geopolímeros. Los polímeros inorgánicos no deben ser considerados una solución universal para todos los problemas de selección de materiales, sino más bien, una solución que puede ser adaptada mediante el diseño del proceso y la mezcla correcta para optimizar las propiedades, y/o reducir el coste para una aplicación dada (Fig.4.7.1) [60].

Según varios autores, entre ellos *Davidovits*, los ligantes geopoliméricos son los análogos amorfos de las zeolitas y requieren condiciones similares de síntesis hidrotérmica; los tiempos de reacción son sustancialmente más rápidos, lo que da como resultado matrices amorfas o semi cristalinas comparadas con las estructuras zeolíticas altamente cristalinas y regulares. El mecanismo exacto mediante el cual ocurre el fraguado y endurecimiento de los geopolímeros no se entiende

55 Review, A. L., Force, A. I. R., & Directorate, M. (2012). *op. cit.* p. 11.

56 *Ibíd.*

57 *Ibíd.*

58 Provis, J. L., van Deventer, J. S. J. (2009). *op. cit.* pp 55-56.

59 Pacheco-Torgal, F. (2015). *op. cit.*

60 Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). *op. cit.* pp. 2917–2933.

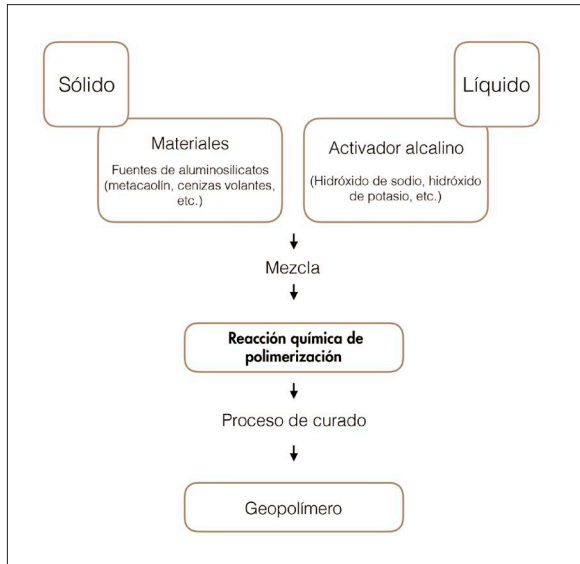


Fig. 4.7.1 Diagrama básico de la formación de geopolímeros.

completamente [61].

Algunas investigaciones [62] sostienen que el mecanismo común que describe el proceso de síntesis de geopolímeros, concuerda con el propuesto por *Glukhovsky* en la década de los cincuenta: (a) disolución - coagulación, (b) coagulación - condensación, (c) condensación - cristalización.

Otros autores [63] proponen modelos de síntesis semejantes (Fig. 4.7.2). Un modelo de dos pasos básicos: (a) generación de especies reactivas, que es la disolución de fases amorfas por álcali, para producir sílice y alúmina reactiva, y (b) reacción de fraguado, que es el proceso de policondensación que conduce a la formación de polímeros de aluminosilicato amorfo o semi-cristalino; o un modelo de tres pasos similar al de *Glukhovsky*: (a) disolución de Si y Al en un medio alcalino (por hidrólisis), (b) condensación de las especies disueltas en monómeros, y (c) la

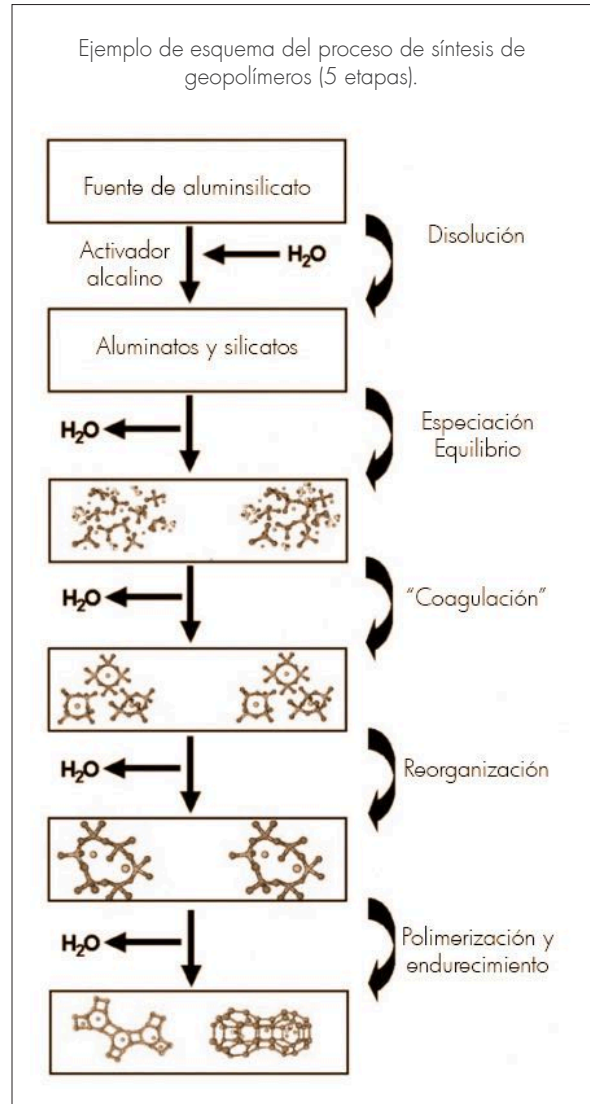


Fig. 4.7.2 Esquema del proceso de síntesis (5 etapas).

policondensación en estructuras poliméricas [64]; o un modelo de cuatro pasos: (a) disolución de minerales de aluminosilicato desencadenados por hidróxido alcalino, (b) difusión de complejos de sílice y alúmina (c) condensación de grandes polímeros amorfos de aluminio y óxido de silicio

61 Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). *op. cit.* pp. 247–266.

62 Pacheco-Torgal, F. (2015). *op. cit.* pp. 28-30.

63 Zhang, G., He, J., & Gambrell, R. P. (2010). *op. cit.* pp.1-2.

64 Lee, N. K., Khalid, H. R., & Lee, H. K. (2016). *Synthesis of mesoporous geopolymers containing zeolite phases by a hydrothermal treatment*. *Microporous and Mesoporous Materials*, 229, 22–30. p. 22. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.04.016>.

tridimensionales, y (d) endurecimiento [65].

Tomando en cuenta lo mencionado, en este trabajo se considera el proceso general de síntesis en tres etapas: disolución, polimerización y cristalización.

2.2.7.1 Primera etapa (a) Disolución

La disolución molecular de los aluminosilicatos se produce inmediatamente después del contacto entre la solución alcalina y el material base, y permite la interacción iónica entre especies y la ruptura de enlaces covalentes entre los átomos de silicio, aluminio y oxígeno (Fig.4.7.3) [66].

La reacción comienza cuando los iones OH⁻ en la solución alcalina separan los enlaces Si-O-Si. Los iones redistribuyen su carga electrónica alrededor de los átomos de silicio, debilitando los enlaces Si-O-Si y haciéndolos más propensos a la ruptura. La presencia del catión alcalino neutraliza la carga negativa resultante, mientras que la formación de enlaces Si-O-Na⁺ obstaculiza la reversión a la estructura Si-O-Si. Los grupos OH⁻ influyen en los enlaces Si-O-Al de la misma manera: las especies de aluminio disueltas forman especies complejas, predominantemente Al(OH)⁴⁻ [67].

Este proceso genera calor rápido e intenso y es

65 Muñoz, J. F., Easton, T., & Dahmen, J. (2015). *op. cit.* p. 87.

66 Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). *op. cit.* pp. 114-118.

67 Pacheco-Torgal, F. (2015). *op. cit.* pp.28-31.

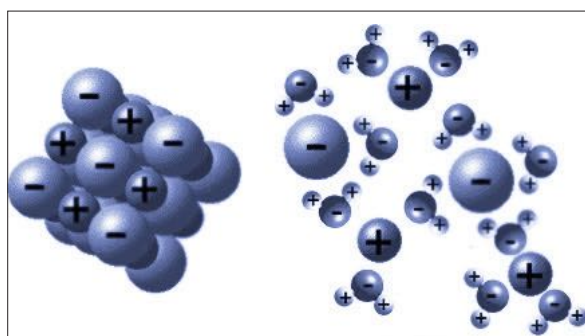


Fig. 4.7.3 Esquema del proceso de disolución. La reacción comienza cuando los iones OH⁻ en la solución alcalina separan los enlaces Si-O-Si.

directamente proporcional al nivel de pH de la solución activadora. La velocidad de disolución es relevante para una rápida y mejor polimerización y varía según la cantidad y composición de la materia prima [68].

2.2.7.2 Segunda etapa (b) Polimerización

El proceso de polimerización implica una reacción química sustancialmente rápida en condiciones alcalinas sobre minerales de Si-Al, dando como resultado una cadena polimérica tridimensional de enlaces Si-O-Al-O.

La acumulación de especies iónicas favorece el contacto entre los productos desagregados y comienza la policondensación generando estructuras coordinadas. Los monómeros de sílice interaccionan para formar dímeros, los cuales a su vez reaccionan con otros monómeros para construir polímeros. Esta etapa es catalizada por los iones OH⁻. Los grupos formados como resultado de la polimerización comienzan a crecer en todas las direcciones, generando coloides [69].

Los aluminatos participan en la polimerización, reemplazando isomórficamente los tetraedros de silicio. Mientras que el metal alcalino cataliza la reacción en la primera etapa, en la segunda actúa como un componente estructural. El producto formado contiene cationes alcalinos que compensan las cargas de déficit asociadas con la sustitución de aluminio por silicio [70].

En primer lugar se forma una fase intermedia rica en aluminio que luego da lugar a un producto rico en silicio estable, que depende de los materiales precursores, las condiciones iniciales de curado y

68 Xie, Z., & Xi, Y. (2001). *Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash*. Cement and Concrete Research, 31(9), 1245-1249. pp.1245-1249. Recuperado en octubre 2017 de: [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00571-3](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00571-3).

69 Pacheco-Torgal, F. (2015). *op. cit.* pp. 28-31.

70 Xie, Z., & Xi, Y. (2001). *op. cit.* pp. 1245-1249.

del tipo de activador [71].

2.2.7.3 Tercera Etapa (c) Cristalización

Las reacciones rápidas entre el álcali y el material base no permiten una cristalización bien estructurada [72]. La mayoría de los geopolímeros endurecidos se denominan precursores zeolíticos en lugar de zeolitas reales ya que el producto final de la geopolimerización es un material semi cristalino amorfo, y la composición de estos productos depende de la mineralogía y composición química de los materiales, activadores alcalinos utilizados y las condiciones de curado que influyen en el endurecimiento y cristalización (Fig.4.7.4).

La velocidad de reacción de activación depende de varios factores como la distribución del tamaño de partícula y la composición mineral del material precursor. Del mismo modo, los tipos de activadores alcalinos, la concentración de activadores, las relaciones de sólidos y líquidos, y el tiempo y las temperaturas de curado son aspectos relevantes en la caracterización y propiedades mecánicas de los geopolímeros. En la práctica, cualquiera que sea el método utilizado, la selección de "activadores" adecuados es la parte más importante de la tecnología [73]. Cuando la mezcla endurece las partículas de aluminosilicato que no han sido disueltas se mantienen unidas mediante los nuevos polímeros, que actúan como aglutinante [74].

2.2.8 OTROS FACTORES IMPLICADOS

Factores tales como el porcentaje de iones alcalinos, la proporción Si-Al en la materia prima, el tipo de álcali, el grado de disolución de los aluminosilicatos y la relación molar Si/Al, tienen una correlación significativa con la resistencia a la

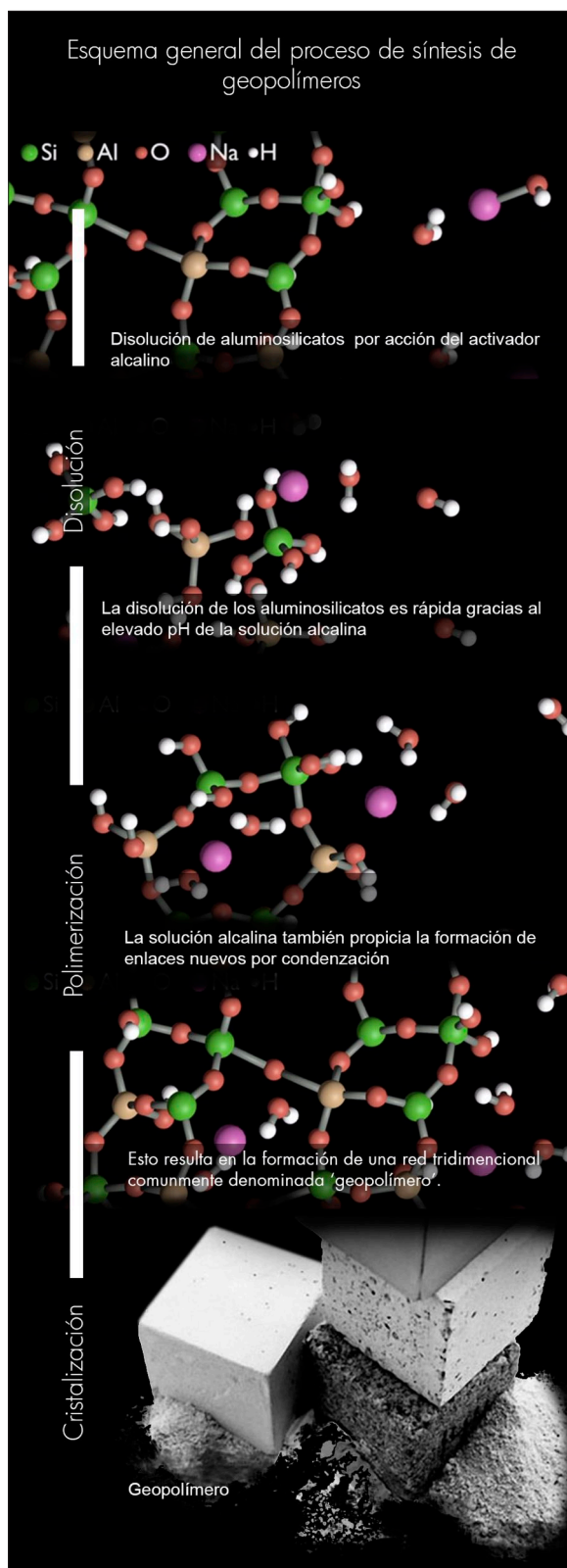


Fig. 4.7.4 Esquema del proceso de síntesis de geopolímeros (3 etapas).

71 Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). *op. cit.* pp.111-119.

72 Review, A. L., Force, A. I. R., & Directorate, M. (2012). *op. cit.* p. 4.

73 *Ibidem* pp. 4-5.

74 Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). *op. cit.* pp. 247-266.

compresión final.

En este contexto se pueden identificar tres factores principales que influyen sobre las características resistentes que tendrá el geopolímero:

- a) el tipo de álcali;
- b) el porcentaje de activador alcalino; y
- c) la concentración de Si en la solución.

En la mayoría de los casos las partículas de aluminosilicatos no pueden disolverse totalmente desde la fase sólida inicial a la fase de polimerización, sin embargo, los sólidos de aluminosilicatos no disueltos contenidos en un geopolímero endurecido pueden comportarse como refuerzo de la matriz (Fig. 4.8.1).

2.2.8.1 El agua

El agua, en la mezcla de geopolímeros, proporciona un medio de reacción y asegura la trabajabilidad de la mezcla durante el proceso y la manipulación.

2.2.8.2 Los materiales de relleno

Los materiales de relleno pueden usarse para mejorar las propiedades deseadas, incluyendo la

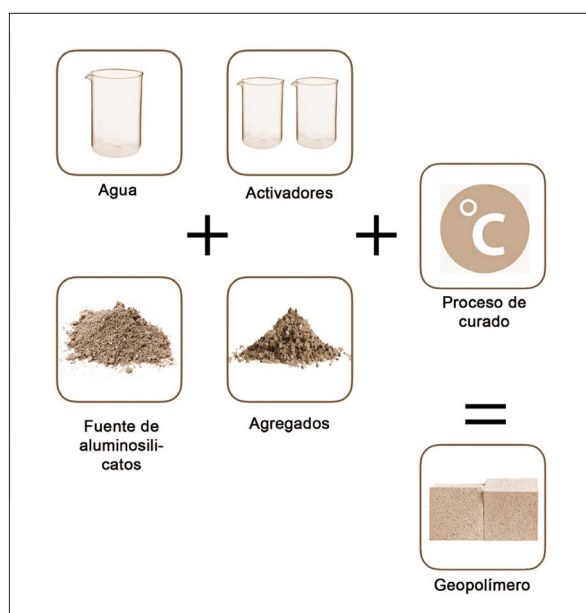


Fig. 4.8.1 Existen diferentes tipos de geopolímeros. El geopolímero final dependerá de los componentes utilizados y de las características de preparación y curado.

resistencia mecánica y la densidad [75]. La arena, como material de relleno, mejora la trabajabilidad de la mezcla, reduce el agrietamiento, disminuye la porosidad del material compuesto y reduce la cantidad de pasta aglutinante haciendo que el material resultante sea menos costoso

2.2.8.3 El proceso de curado

Los geopolímeros fabricados con fuentes ricas en aluminosilicato reactivo normalmente obtienen un 70% de la resistencia final en las primeras 3-4 horas de curado. La temperatura de curado es un factor importante [76].

Las reacciones puzolánicas son aceleradas por el aumento de la temperatura. A temperatura ambiente la reacción de geopolimerización es lenta. El tiempo de fraguado se reduce cuando las reacciones puzolánicas son aceleradas por el aumento de la temperatura que a la vez incrementa la resistencia a la compresión [77].

Está demostrado que el curado a 75°C durante 4 horas puede completar una parte importante del proceso de geopolimerización de aluminosilicatos reactivos, dando como resultado un geopolímero a base de ceniza volante con propiedades satisfactorias. El curado a temperatura elevada es eficaz y brinda una contribución más significativa en las reacciones geopoliméricas. También se ha observado que la resistencia a la compresión final puede disminuir al exponer los especímenes a una temperatura alta durante un período de tiempo largo [78].

2.2.9 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

El cemento *Portland* es el principal material utilizado para la elaboración de hormigón que, a la vez, es el material más usado en el mundo después del

75 Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2013). *op. cit.* p.120.

76 Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). *op. cit.* pp. 729–746

77 Ibíd

78 Ibíd

agua [79]. Su producción implica temperaturas muy altas (1400-1500°C) [80] y emisiones de gases de efecto invernadero (Fig. 4.9.1). La producción de 1 tonelada de cemento *Portland* ordinario genera 0,55 t de CO₂ y una cantidad adicional de 0,39 t de CO₂ del combustible necesario para hornear y moler, lo que representa un total de 0,94 toneladas de CO₂ [81,82]. Se podría decir que por la fabricación de cada tonelada de cemento *Portland* se libera una tonelada de CO₂ al medio ambiente [83].

Las publicaciones sobre aglomerantes a base de cementos activados con álcali y geopolímeros, indican que estos materiales tienen un alto potencial para convertirse en sucesores del cemento *Portland*, cerámicas convencionales y materiales con gran cantidad de energía incorporada [84,85]. Por ejemplo, si se formula correctamente el geopolímero hecho de cenizas volantes, escorias metalúrgicas o puzolana natural, se podría reducir las emisiones de CO₂ asociadas con la fabricación de cemento convencional en al menos el 80% [86].

El uso de geopolímeros representa una alternativa viable para disminuir la huella de carbono y una solución para problemas de gestión de residuos, relacionados con los materiales sólidos de aluminosilicatos generados a partir de subproductos de diversas industrias. Además está demostrado

79 Rábano, I., Mata-Perelló, J. M., & Moreno-Eiris, E. (2006). *Patrimonio geológico y minero : su caracterización y puesta en valor*. Instituto Geológico y Minero de España. . p. 236. Retrieved from <https://bit.ly/2SGe6He>.

80 Review, A. L., Force, A. I. R., & Directorate, M. (2012). *op. cit.* p.01.

81 Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2017). *op. cit.* p.195.

82 Gartner E. *Industrially interesting approaches to low-CO2 cements*. *Cem Concr Res* 2004;34:1489–98.

83 Palomo, A., Krivenko, P., Kavalerova, E., & Maltseva, O. (2014). *op. cit.* pp. 1-24.

84 Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). *op. cit.* pp. 1590–1597.

85 Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2017). *op. cit.* pp.195-216.

86 *Ibidem* pp. 217-262.



Fig. 4.9.1 En la actualidad las prácticas y materiales empleados en la construcción conllevan un alto impacto ambiental. La producción de una tonelada de cemento *Portland* genera una tonelada de CO₂ que es liberada en la atmósfera.

que el hormigón a base de geopolímeros de subproductos industriales posee propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad similares o mejores en comparación con el hormigón a base de cemento *Portland* común [87].

En este contexto, hay que considerar que para contribuir a la disminución de la huella de carbono existen una serie de factores que pueden ser optimizados: el uso del activador químico, el régimen de curado, la distribución del tamaño de partícula de los materiales fuente, la resistencia mecánica, las propiedades físicas, la microestructura, la durabilidad, etc. Por ejemplo, se ha identificado que el contenido de activadores alcalinos y los tratamientos a temperatura elevada de los geopolímeros se encuentran entre los principales factores que pueden ser optimizados[88]. El uso de una solución de NaOH o KOH en lugar de una solución de silicato, caolinita en lugar de metacaolín [89] o el uso de aluminosilicatos naturales sin activación térmica convencional, reduciría las emisiones de CO₂ [90].

La geopolimerización constituye un cambio radical en la química de los materiales de construcción y en los mecanismos de síntesis en comparación con la química del cemento *Portland* o las cerámicas cocidas a altas temperaturas. Presentan una serie de ventajas mecánicas, ambientales y económicas [91].

2.2.10 INTERÉS CIENTÍFICO EN GEOPOLÍMEROS

La situación medioambiental y el crecimiento de los países en desarrollo vaticinan la construcción a corto y mediano plazo de grandes infraestructuras

(lo que se traduce en un fuerte incremento de demanda de materiales de construcción para las próximas décadas). Esto ha despertado el interés en materiales alternativos. En los últimos años se ha evidenciado un incremento importante en la investigación de geopolímeros, lo que es esencial para el desarrollo de la tecnología ya que existen aspectos que hacen falta estudiarlos a profundidad [92].

En el pasado, por falta de conocimiento, los compuestos de metales alcalinos se excluyeron de los componentes del cemento *Portland*. La mayor parte del siglo XX la industria del cemento evitó el uso de álcalis. Contradictoriamente, con el paso del tiempo, un gran volumen de estudios modernos determinó que la razón de la excelente durabilidad de muchos de los aglutinantes de la antigüedad, se debía precisamente a la mineralogía rica en metales alcalinos y silicatos de calcio hidratados [93].

En los años sesenta, en Kiev - Ucrania, el interés científico se inició con una serie de estudios sobre la utilización de escoria de alto horno activada alcalinamente para la producción de materiales utilizados en la construcción de edificios de apartamentos, elementos para vías de ferrocarril, tramos de carreteras, tuberías, canales de riego y drenaje, losas y bloques. También se produjeron un gran número de patentes y normas para las mezclas de escoria, pero esta documentación ha sido en gran parte inaccesible [94].

Muchas de las primeras investigaciones publicadas sobre geopolímeros de aluminosilicatos fueron patentes (por ejemplo: *Davidovits* 1982 [95], 1984 [96]) y por lo tanto contienen pocos

87 *Ibid.*

88 *Ibidem.* pp. 263-334.

89 Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2013). *op. cit.* pp. 120–125.

90 Esaifan, M., Rahier, H., Barhoum, A., Khoury, H., Hourani, M., & Wastiels, J. (2015). *op. cit.* pp.251-259.

91 Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2017). *op. cit.* pp. 217-262.

92 Nazari, A., & Sanjayan, J. G. (2017). *op. cit.* pp. 217-262.

93 Palomo, A., Krivenko, P., Kavalerova, E., & Maltseva, O. (2014). *op. cit.* pp. 1-24.

94 Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *op. cit.* p. 32.

95 Davidovits, J. (1982) *Mineral polymers and methods of making them*, U.S. Patent 4,349,386.

96 Davidovits, J. (1984) *Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process*, U.S. Patent 4,472,199.

detalles científicos. Probablemente los documentos más relevantes que resumieron el trabajo a lo largo de los años ochenta, son los trabajos de una conferencia celebrada en Francia en 1988 (Davidovits y Orlinski 1988 [97]) y un artículo de revisión escrito por Davidovits (1991 [98]).

Poco después de esto Palomo y Glasser publicaron el primer estudio científico detallado de los geopolímeros de metacaolín (Palomo y Glasser 1992 [99]). Posteriormente, los trabajos de las conferencias *Geopolymer* celebradas en 1999 (Davidovits 1999 [100]), 2002 (Lukey 2002 [101]) y 2005 (Davidovits 2005 [102]), también proporcionaron valiosa información tanto sobre los desarrollos técnicos en el campo, como sobre el crecimiento mundial en la investigación de geopolímeros durante este período. Un libro publicado por Davidovits (2008 [103]) también resume una buena parte del trabajo que sólo estaba disponible anteriormente en la literatura de patentes [104].

Los aglomerantes alcalinos hicieron su primera aparición oficial hace más de 50 años, pero muchos factores, algunos todavía actuales, han frenado el desarrollo y adopción de la tecnología de activación alcalina. Una razón obvia predomina

97 Davidovits, J. and Orlinski, J. (1988) *Proceedings of Geopolymer '88 – First European Conference on Soft Mineralogy*. Compeigne, France.

98 Davidovits, J. (1991) *Geopolymers – Inorganic polymeric new materials*. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656. doi:10.1007/BF01912193.

99 Palomo, A. and Glasser, F. P. (1992) *Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin*. *British Ceramic Transactions and Journal*, 91, 107–112.

100 Davidovits, J., Davidovits, R. and James, C. (1999) *Proceedings of Géopolymère '99 – Second International Conference*. Saint-Quentin, France.

101 Lukey, G. C. (2002) *Proceedings of Geopolymers 2002 – Turn Potential into Profit*, Melbourne, Australia.

102 Davidovits, J. (2005) *Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of World Congress Geopolymer 2005*. Saint-Quentin, France.

103 Davidovits, J. (2008) *op. cit.*

104 Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). *op.cit.* pp.01-07.

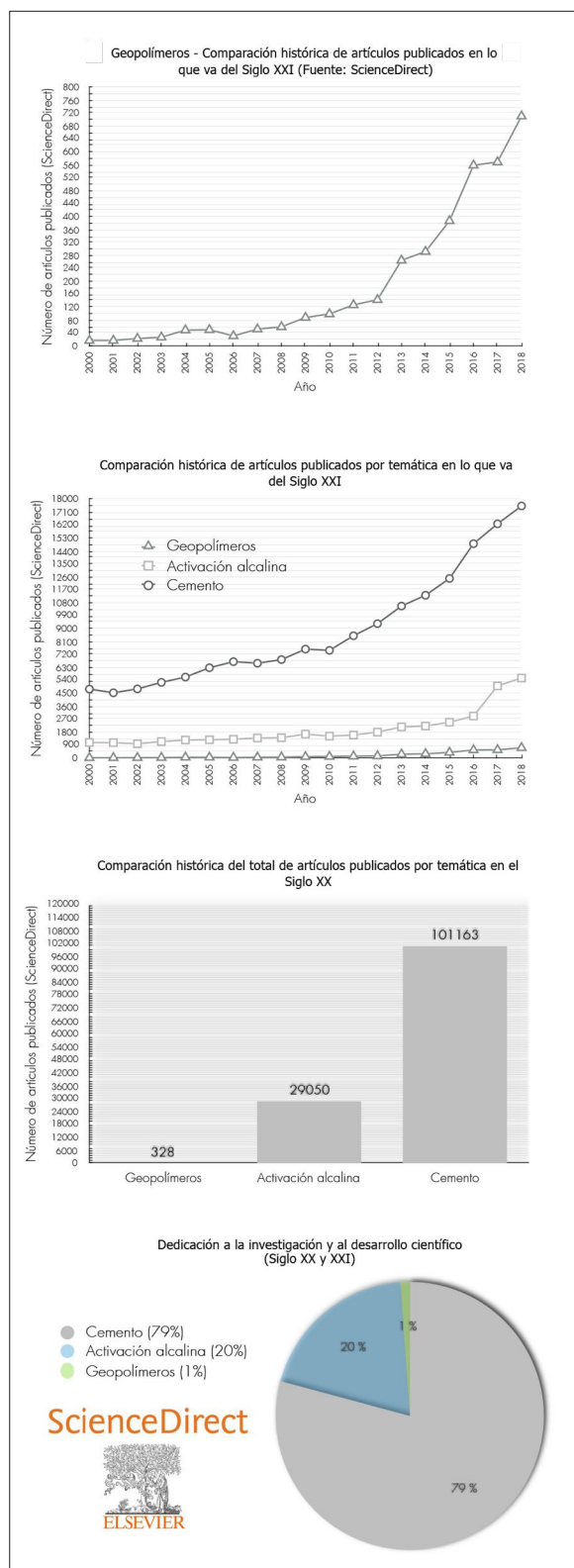


Fig. 4.10.1 Dedicación a la investigación de Geopolímeros. Análisis comparativo según datos de Science Direct.

sobre el resto: las grandes empresas internacionales del cemento, no han estado ni están interesadas en promover la sustitución del cemento Portland por aglutinantes alternativos como materiales de construcción [105].

El cemento es un negocio muy lucrativo y los agentes que lo monopolizan temen que un cambio en sus fundamentos de producción detraiga los beneficios económicos que genera en todo el mundo. Quienes rechazan el cambio de la tecnología de aglomerantes de construcción afirman que un nuevo producto no puede ser lanzado en el mercado sin una revisión científico-técnica profunda, pero los aglutinantes alcalinos han pasado esa prueba. El fondo científico y técnico disponible sobre los cementos alcalinos de hoy es mucho mayor que el conocimiento que se disponía sobre el cemento *Portland* cuando fue adoptado como un material de construcción masivo [106].

Las bases de datos científicas demuestran que la investigación en el campo de geopolímeros ha crecido exponencialmente en los últimos años. En los gráficos Fig.4.10.1 y Fig.4.10.2 observamos una comparación histórica de artículos publicados en las bases de datos *Science Direct* y *Web of Science* respectivamente en donde se observa este fenómeno. También se observa la brecha entre la dedicación brindada al estudio de cementos en comparación con la dedicación brindada al desarrollo de geopolímeros y materiales activados alcalinamente.

De todos modos, hasta ahora, se ha demostrado que la geopolimerización puede transformar una amplia gama de residuos de materiales de aluminosilicato en materiales de construcción con excelentes propiedades químicas y físicas. Es bien sabido que los geopolímeros poseen excelentes propiedades (mecánicas, resistencia al fuego y resistencia a los ácidos). Estas propiedades hacen de los geopolímeros un material con gran potencial para la construcción que ha atraído atención a

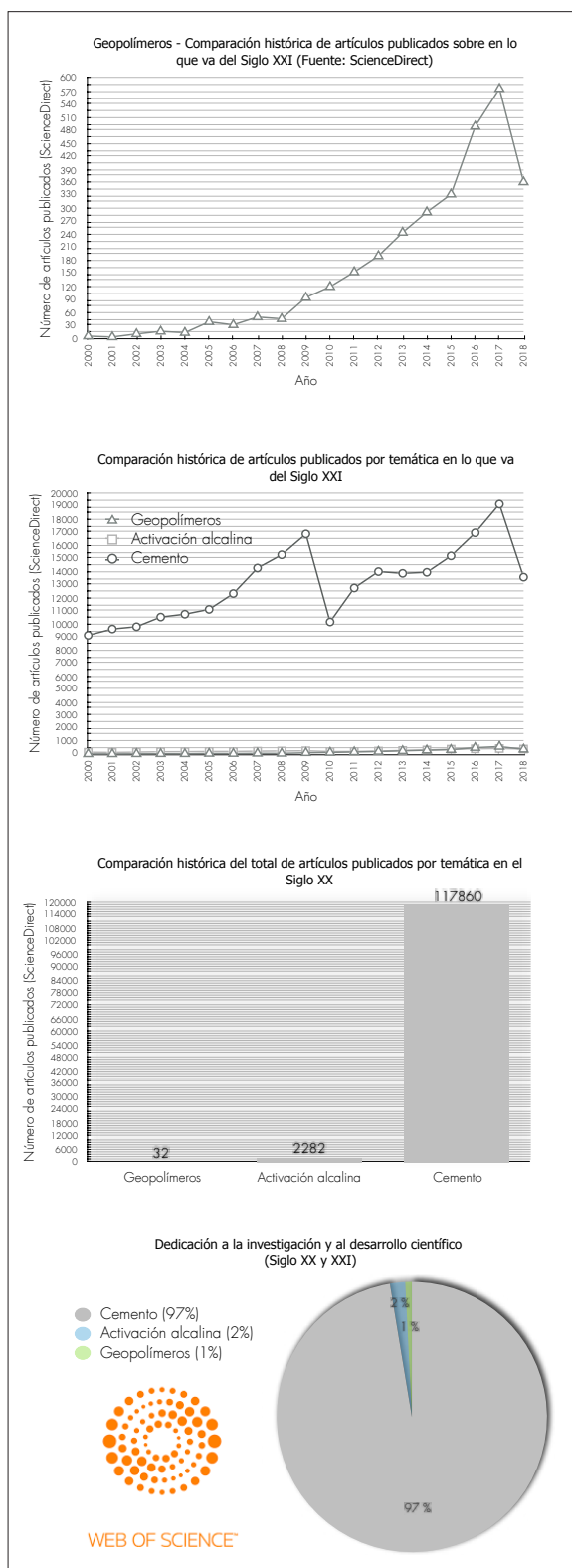


Fig. 4.10.2 Dedicación a la investigación de Geopolímeros. Análisis comparativo según datos de Web of Science.

105 Palomo, A., Krivenko, P., Kavalerova, E., & Maltseva, O. (2014). *op. cit.* pp. 01-24.

106 *Ibíd.*

nivel internacional en los últimos 20 años. Aunque las aplicaciones comerciales de los geopolímeros son limitadas en la actualidad, un reciente aumento de la actividad de investigación y desarrollo podría facilitar la aceptación más amplia de estos materiales [107].

Pese a que la activación alcalina se conoce desde hace mucho tiempo, la literatura sobre este tema es mínima en comparación a la dedicación dada a otros materiales. Los estudios de geopolímeros como remplazo de componentes de elementos convencionales de construcción: ladrillos cocidos, tejas o productos cementosos, es escaso [108]. Año tras año el interés en el estudio de geopolímeros aumenta pero la comparación con los esfuerzos depositados en el desarrollo del cemento *Portland* (Fig.4.10.1 y Fig.4.10.2), evidencia la necesidad de un cambio de visión y de prioridades por parte de los investigadores e instituciones académicas responsables del desarrollo de nuevos materiales y tecnologías.

2.2.11 USO DE GEOPOLÍMEROS EN LA CONSTRUCCIÓN

Las primeras aplicaciones para cementos alternativos en la construcción datan de los años sesenta. En un inicio las investigaciones y el uso de estos materiales se aplicaron en la antigua Unión Soviética en elementos constructivos basados en cementos a base de escoria alcalinamente activada. Se produjeron patentes y normas sobre dichas mezclas pero esta documentación ha sido en gran parte inaccesible para el Oeste. La aplicación de cementos alcalinos a base de cenizas volantes es más reciente [109].

2.2.11.1 Uso de cementos alcalinos

El gran potencial de los cementos alcalinos ha sido ampliamente demostrado por investigaciones

llevadas a cabo en países como Rusia, Ucrania, Polonia, Finlandia, Japón, China, Francia, Estados Unidos, Canadá, India, Australia, España y Reino Unido [110].

Un ejemplo de la temprana producción comercial de hormigones de escoria activados con hidróxido alcalino se dio en 1960 en Mariupol, Ucrania. Estos hormigones en forma de bloques prefabricados fueron utilizados para la construcción de viviendas, garajes y otras infraestructuras, incluyendo edificios de apartamentos (Fig.4.11.1) de dos a 15 plantas. La planta de fabricación de bloques fue cerrada a principio de los años ochenta pero la producción de concreto pre mezclado de escorias activadas por álcali y productos de hormigón se reanudó en 1999. Este hormigón activado por álcali se ha

110 Palomo, A., Krivenko, P., Kavalerova, E., & Maltseva, O. (2014). *op. cit.* pp. 01-24.



Fig. 4.11.1 Edificio residencial en Mariupol, Ucrania, construido a partir de bloques prefabricados de escoria activadas con hidróxido alcalino (exterior revestido de yeso).

107 Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). *op. cit.* pp. 247-266.

108 Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2013). *op. cit.*

109 Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *op. cit.* pp. 1-7.

utilizado en diferentes áreas, incluyendo calzadas para vehículos pesados moldeadas *in-situ* o prefabricadas, así como la producción comercial de estructuras portantes. Estas instalaciones han producido más de 20.000 m³ desde 2002 en varios grados de resistencia y los cálculos económicos muestran ahorros significativos (hasta un 50%) en comparación con los hormigones de cemento *Portland* de grado de resistencia equivalente [111].

En 1974, en Cracovia, se construyó un almacén utilizando hormigón prefabricado a partir de escorias alcalinamente activadas para las losas de suelo y los paneles de pared. Las composiciones de hormigón incluyeron escoria de alto horno granulada molida, agregados mezclados, Na₂CO₃ y agua. Los productos se fundieron y curaron en un túnel de calentamiento a 70°C durante 6 horas y luego se pusieron en servicio. Dicho edificio ha sido monitoreado por muchos años. Más de 25 años después de su construcción muestras de núcleos cilíndricos de 100 mm de diámetro fueron tomadas de los paneles de paredes exteriores para pruebas de resistencia a la compresión, profundidad de carbonatación y microestructura. Hay un aumento muy significativo de la fuerza de 28 días a 27 años en todos los casos, así como una tasa media de carbonatación de menos de 0,5 mm/año en todas las muestras. No hubo evidencia observable de micro-agrietamiento, problemas de reacción de álcali-sílice o corrosión de acero después de este período prolongado de tiempo en servicio [112].

Otro ejemplo de la aplicación y uso de cementos alcalinos se observa en varios edificios residenciales de gran altura (más de 20 plantas) que fueron construidos con hormigón basado en escorias alcalinamente activadas por la empresa industrial *Tsentrmetsallurgremont* entre 1986 y 1994, incluyendo el edificio de 24 pisos representado en la Fig. 6.11.2. Las paredes exteriores de los tres edificios fueron fundidas *in situ* y las planchas de piso, escaleras y otros componentes estructurales



Fig. 4.11.2 Edificio de 24 pisos construido con hormigón de cemento de escoria activada por álcali, Lipetsk, Rusia, 1994.

fueron pre fundidos, todos usando concreto *BFS* (*Blast Furnace Slag*) activado con carbonato alcalino. El hormigón para el vertido *in situ* fue transportado de la estación de mezclado al sitio de construcción usando camiones de hormigón regulares y curado con elementos de calefacción eléctrica. Los elementos prefabricados fueron fundidos y curados al vapor en una planta, después del curado al vapor se obtuvo una resistencia de 25 MPa. La arena de cuarzo era el agregado fino y la caliza dolomítica era el agregado grueso; Se observó una buena compatibilidad entre el aglutinante activado con álcali y los agregados, sin evidencia de reacción alcalina sobre el agregado [113].

Los cementos alcalinos también han sido utilizados

111 Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *op. cit.* 309-338.

112 *Ibíd.*

113 *Ibíd.*

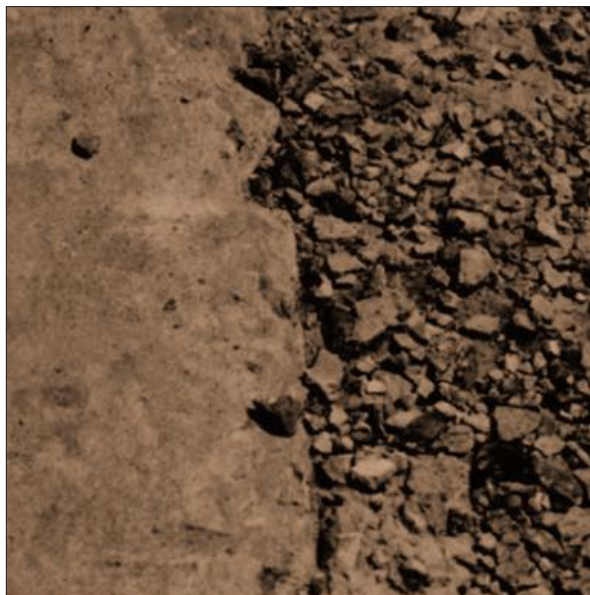


Fig. 4.11.3 Comparación de hormigón vertido in situ, de cemento de escoria activada por álcali (lado izquierdo) y cemento Portland (lado derecho). Ternopol, Ucrania.

en obras de ingeniería civil. Por ejemplo, la empresa *Ternopol-Promstroy*, de la ciudad de Ternopol, Ucrania, construyó dos carreteras, una con hormigón *Portland* y otra con hormigón basado en escorias alcalinamente activadas (Fig. 4.11.3). El hormigón fue fundido *in situ* en 1984. En 1999, se inspeccionaron las obras, observando que la carretera construida con el hormigón basado en escorias alcalinamente activadas estaba en perfecto estado, mientras que la construida con cemento *Portland* se deterioró seriamente [114].

2.2.11.2 Uso de geopolímeros

Inicialmente, los geopolímeros fueron comercializados por razones relacionadas con la resistencia al fuego, pero la resistencia mecánica que alcanzaba el material tempranamente a través de combinaciones químicas de activación alcalina llamó la atención y el interés del gobierno y de la industria en los EE.UU. En los años ochenta y noventa un "hormigón" híbrido alcalinamente activado llamado *Pyrament*, fue desarrollado y comercializado junto a una gama de productos diseñados a través de "The Geopolymer Institute".

Este nuevo "hormigón" alcanzaba una resistencia a la compresión de 20 MPa en 4 horas bajo condiciones de curado estándar y en el mismo tiempo, a temperaturas tan bajas como -2°C , podía alcanzar resistencias suficientes para soportar la carga de un avión militar. Este material se utilizó en la Guerra del Golfo Pérsico de 1991 para la rápida construcción de pistas de aterrizaje. Para 1993 *Pyrament* se había aplicado en 50 instalaciones industriales y 57 instalaciones militares de Estados Unidos, así como en otros siete países [115].

A principios de 1990 *Wastiels J, Wu X, Faignet S, Patfoort G.* describieron por primera vez la activación alcalina de cenizas volantes [116] y un aglutinante de estas características fue patentado y comercializado casi al mismo tiempo en los Países Bajos como un material resistente al ácido para la producción de tuberías [117]. Cada vez es más frecuente la producción y comercialización de productos de construcción a base de materiales alcalinamente activados por empresas en el Reino Unido, los Países Bajos, la República Checa, Australia, y el resto de Europa.

Un ejemplo destacado del uso de geopolímeros en la construcción es el edificio del Instituto del Cambio Global de la Universidad de Queensland (*The University of Queensland Global Change Institute*) (Fig.4.11.4 y Fig.4.11.5). Diseñado por *HASSELL* en colaboración con *Bligh Tanner, Arup* y *Medland Metropolis* y construido en el año 2013. Es considerado uno de los primeros edificios modernos que utilizan hormigón geopolímero para fines estructurales [118]. Los diseñadores, con el afán de optimizar el comportamiento energético del edificio, utilizaron elementos de hormigón de geopolímero prefabricado que reemplaza el hormigón común.

115 Davidovits, J. (2015). *op. cit.* pp. 03-17.

116 Wastiels J, Wu X, Faignet S, Patfoort G. 1994. *Mineral polymer based on fly ash*. J. Resour. Manag. Technol. 22:135-41.

117 Blaakmeer J. 1994. *Diabind: an alkali-activated slag fly ash binder for acid-resistant concrete*. Adv. Cem. Based Mater. 1:275-76.

118 Recuperado en octubre 2017 de: <https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/>.

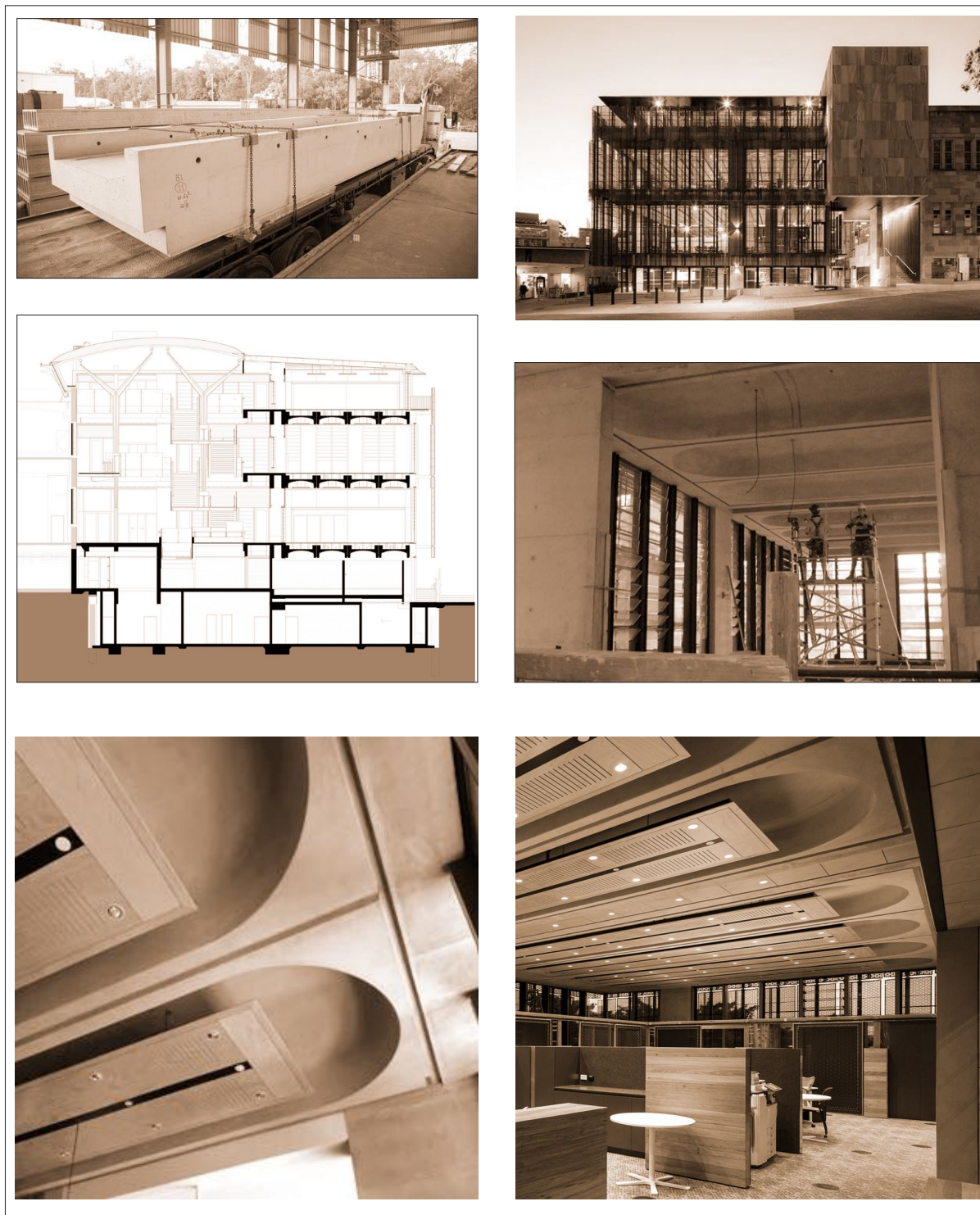


Fig. 4.11.4 The University of Queensland Global Change Institute. HASSELL en colaboración con Bligh Tanner, Arup y Medland Metropolis, 2013. Utilización de piezas estructurales de geopolímeros (créditos en apartado: Lista de figuras, imágenes y créditos).

Los 33 paneles prefabricados estructurales del edificio se fabricaron de *Earth Friendly Concrete (EFC)*, forma comercial del concreto de geopolímero, que es una marca de la fábrica *Wagners*. Contiene arena, agregados, un aglutinante que contiene escoria de alto horno molida y granulada (un producto de desecho de la producción de acero), cenizas volantes (un producto de desecho de la generación de energía de carbón). No contiene cemento *Portland*, esto le permite tener emisiones de CO_2 muy bajas en comparación con el hormigón de cemento común.

Los paneles prefabricados también forman parte del diseño de refrigeración pasiva del edificio. Además de ser más respetuosos con el medio ambiente los paneles tienen tiempos de curado más rápidos, lo que contribuye a reducir los costos de producción. La composición química del aglutinante ayudó a que los paneles prefabricados de geopolímero experimenten baja contracción, bajo calor de reacción que evita la posibilidad de agrietamiento térmico, una resistencia a la flexión 30 por ciento superior a la del hormigón normal y una mayor durabilidad que el hormigón normal [119]. El edificio ha sido galardonado con más de catorce premios. El uso innovador y pionero del hormigón geopolímero en el proyecto a sido reconocido por el *Green Building Council Australia*.

Los geopolímeros o polímeros inorgánicos abarcan una gran familia de materiales relativamente nuevos que se presentan como una alternativa a materiales convencionales con gran cantidad de energía incorporada. Las características de los geopolímeros dependen de los materiales de partida y de los procesos de síntesis. Hasta ahora, para la obtención de mejores resultados se ha hecho uso de aluminosilicatos altamente reactivos, es decir, aluminosilicatos cuyas estructuras han sido alteradas por deshidroxilación a temperaturas superiores a 550°C , volviéndolos más susceptibles a la disolución en sustancias alcalinas con alto pH (12-14) y molaridades superiores a 10M,

garantizando así la formación de nuevas redes estructurales formadas a partir de la disolución, polimerización y cristalización de los elementos que intervienen.

Los aluminosilicatos aptos para geopolimerización comúnmente se clasifican según la relación Si/Al (cadenas silato). Las cadenas silato contienen átomos de silicio que comparten átomos de oxígeno y son equilibradas por iones positivos Na^+ , K^+ , etc. Otros factores que influyen son el agua, los materiales de relleno y la temperatura. La optimización de geopolímeros está estrechamente relacionada a la sinergia entre las variables que intervienen.

El creciente interés en el estudio de polímeros inorgánicos (geopolímeros) se ha visto reflejado en el incremento del volumen de investigaciones en los últimos años. Al mismo tiempo, la aplicación de estos materiales en la construcción ha tenido resultados sobresalientes mediante el uso de cenizas volantes, escorias de alto horno y metacaolín como materiales precursores. La posibilidad de utilizar diferentes tipos de materiales como precursores de aluminosilicatos abre un gran campo de estudio.

Como se ha observado, los geopolímeros más utilizados en la construcción hasta ahora han sido aquellos fabricados a partir de materias primas ricas en aluminosilicatos altamente reactivos. Los geopolímeros a base de arcilla natural, capítulo que se trata a continuación, aún no han sido utilizados en elementos constructivos de edificios ya que la tecnología está en etapa de desarrollo. En este contexto, pese a que los aluminosilicatos naturales han sido considerados una alternativa menos atractiva debido a la baja reactividad de sus componentes en comparación con otras fuentes, la gran disponibilidad de arcillas y materiales térreos justifica su estudio y desarrollo.

119 Recuperado en octubre 2017 de: <http://www.architectureanddesign.com.au/news/uq-s-global-change-institute-is-first-to-use-cement>.



Fig. 5.0.1 Imagen SEM de una vermiculita expandida (créditos en apartado: Lista de figuras, imágenes y créditos).

2.3 GEOPOLÍMEROS A BASE DE ARCILLAS

CONTENIDO:

- 2.3.1 Antecedentes
- 2.3.2 Características poliméricas de los aluminosilicatos
 - 2.3.2.1 Características poliméricas del silicio
 - 2.3.2.2 Características poliméricas del aluminio
- 2.3.3 Aluminosilicatos laminares: arcillas
 - 2.3.3.1 Estructuras de lámina
- 2.3.4 Reactividad de las arcillas
 - 2.3.4.1 Efectos por tratamiento térmico
 - 2.3.4.2 Alternativas de tratamiento químico
 - 2.3.4.3 Interacciones orgánicas
 - 2.3.4.4 Tratamiento por trituración mecánica
- 2.3.5 Disolución de aluminosilicatos de arcilla
- 2.3.6 Investigaciones destacadas
 - 2.3.6.1 Uso de caolinita no tratada térmicamente
 - 2.3.6.2 Influencia de la concentración de Na y K
 - 2.3.6.3 Efecto de la activación mecánica y el proceso de curado
 - 2.3.6.4 Caracterización de caolinita activada

2.3.1 ANTECEDENTES

Los polímeros [del griego *polys* (muchos) y *meros* (partes o segmentos)], desde su definición básica, son macromoléculas formadas por la unión de una o más unidades simples llamadas monómeros. Por ello, independientemente del contenido de carbono, se puede decir que la mayoría de materiales compuestos de diferentes elementos o partes que se apegan a esta definición son un tipo de "polímeros".

Como se mencionó en el capítulo anterior, la materia prima comúnmente utilizada para fabricar geopolímeros está compuesta por materiales ricos en oxígeno, alúmina (Al_2O_3 , óxido de aluminio) y

silíce (SiO₂, óxido de silicio) [1], preferiblemente aluminosilicatos que se encuentren en una fase amorfa reactiva y constituyan más del 70% de la composición del material precursor, debido a que estos elementos desempeñan un papel importante como fuente de iones Al³⁺ y Si⁴⁺ [2].

En los últimos años la posibilidad de utilizar diferentes fuentes de aluminosilicatos ha propiciado el desarrollo de estudios sobre geopolimerización a partir de diversos materiales precursores: subproductos industriales, cenizas de fibras vegetales, lodos rojos, escombros de la construcción, aluminosilicatos naturales, etc.

Por ejemplo, está demostrado que los suelos puzolánicos tratados con soluciones alcalinas dan como resultado materiales similares a los geopolímeros a base de metacaolín [3]. Esto se debe a las elevadas temperaturas a las que la materia prima ("tierra" comúnmente formada por más de un 75% de silicatos y aluminosilicatos [4]) fue expuesta por actividad volcánica.

Para la elaboración de geopolímeros de arcillas la mayoría de veces se parte de un proceso previo de alteración térmica que amplifica las características reactivas naturales del material, tal como sucede con el metacaolín (caolín calcinado). Se han estudiado geopolímeros a partir de metacaolín combinado con hidróxido de calcio, escorias,

cenizas, etc. [5]. Estos materiales precursores actúan como un aglutinante y como un relleno en la matriz del geopolímero que, en algunos casos, mejoran las características resistentes finales [6].

En este contexto, los estudios científicos sobre geopolimerización de arcillas sin calcinar, en comparación con los estudios dedicados a geopolímeros de metacaolín, son escasos. Pese a ello, la gran disponibilidad de arcillas y su fácil obtención justifica su estudio como un material precursor alternativo para la elaboración de geopolímeros como materiales para la construcción.

1 Wan, Q., Rao, F., & Song, S. (2017). *Reexamining calcination of kaolinite for the synthesis of metakaolin geopolymers - roles of dehydroxylation and recrystallization*. Journal of Non-Crystalline Solids, 460, 74–80. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.01.024>.

2 Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). *Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review*. Progress in Materials Science, 83, 595–629. p. 597. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>.

3 Lemougna, P. N., MacKenzie, K. J. D., & Melo, U. F. C. (2011). *Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash*. Ceramics International, 37(8), 3011–3018. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.002>.

4 Dietrich, R. V., & Skinner, B. J. (1979). *Rocks and rock minerals*. Wiley. Recuperado en octubre 2017 de: https://books.google.es/books/about/Rocks_and_Rock_Minerals.html?id=moSAQAIAAJ&redir_esc=y.

5 Borges, P. H. R., Banthia, N., Alcmand, H. A., Vasconcelos, W. L., & Nunes, E. H. M. (2016). *Performance of blended metakaolin/blastfurnace slag alkali-activated mortars*. Cement and Concrete Composites, 71, 42–52. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.008>.

6 Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). *op. cit.* p. 597.

Composición de minerales de arcilla								
	Caolinita	Halloysita blanca	Illite	Montmorillonita	Beidellita	Nontronita	Saponita	Vermiculita
SiO ₂	46.20	44.46	51.25	56.59	55.80	51.46	50.25	34.04
TiO ₂	0.09	0.15	0.17	0.06	0.26	0.05	0.03	15.37
Al ₂ O ₃	39.29	36.58	23.53	20.06	28.60	2.2	4.44	15.37
Fe ₂ O ₃	0.23	0.36	2.02	3.19	0.41	24.70	0.5	8.01
FeO	-	0.07	0.33	-	-	-	-	-
MnO	-	-	-	0.03	-	-	-	-
MgO	0.07	0.18	3.32	3.10	2.03	3.27	23.81	22.58
CaO	0.06	0.19	0.59	0.68	2.23	1.45	1.7	0.00
Na ₂ O	0.09	0.01	0.05	2.17	0.09	1.06	0.76	0.00
K ₂ O	0.21	0.51	7.61	0.45	0.48	0.24	0.1	0.00
H ₂ O+	13.80	13.38	5.87	13.67	9.70	15.34	7.25	19.93
H ₂ O-	-	4.05	5.26	-	-	-	10.76	-
Total	99.95	100.12	100.02	100	99.60	99.80	99.69	99.93

Características de minerales de arcilla				
	Caolinitas	Illitas	Smectitas	Vermiculitas
Tipo de estructura	1:1	2:1	2:1	2:1
Octahedral component	Tetraédrica y octaédrica	Mayormente octaédrica	Di octaédrica o tri octaédrica	Mayormente tri octaédrica
Principales cationes intercapa	Nil	K	Ca,Na	Mg
Agua intercapa	Solo en halloysita	Variable	Ca, dos capas; Na una capa mols	Una o dos capas
Espaciado Basal	7.1 Å (10 Å en halloysita)	10 Å	Variable, mas 15 Å (para Ca)	Variable; 14.4 Å cuando está completamente hidratada
Fórmula química	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ , y pequeñas variaciones	K _{1-0.5} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	M _{0-0.7} (Y ₃₊ ,Y ₂₊) ₀₋₆ (Si,Al) ₂ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O	(Y ₂₊ ,Y ₃₊) ₀₋₆ (Si,Al) ₂ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O

Fig. 5.1.1 Composición y características de los principales minerales de arcilla.

Si bien la composición de la arcilla depende del origen mineral y de las transformaciones físico-químicas a las que ha sido expuesta, la mayoría de arcillas contienen aluminosilicatos y son ricas en Al_2O_3 y SiO_2 , con una composición total de ambos en rango variable (Fig. 5.1.1) [7]. Dentro de los aluminosilicatos, el silicio y aluminio, en interacción con el oxígeno y otros elementos, pueden unirse para formar cadenas, que a su vez formarán moléculas y macro moléculas de redes 'poliméricas', con características particulares según las propiedades de los elementos y las condiciones implicadas.

Este apartado se enfoca en el estado del arte de la geopolimerización de aluminosilicatos naturales de arcilla, prestando especial atención a los procesos que no involucran un tratamiento térmico de deshidroxilación inicial. Para ello, a continuación se revisan las características poliméricas del silicio y del aluminio, los aluminosilicatos laminares (arcillas), la reactividad de las arcillas, la disolución de los aluminosilicatos de arcilla y algunas investigaciones destacadas realizadas sobre el uso de activadores alcalinos con arcillas naturales.

2.3.2 CARACTERÍSTICAS POLIMÉRICAS DE LOS ALUMINOSILICATOS

2.3.2.1 Características poliméricas del silicio

Los tetraedros de silicio tienen una fuerte tendencia a la 'polimerización' entre sí. El ratio de Si para O junto con un aumento en el grado de polimerización, disminuye de 1:4 para ortosilicatos que contienen unidades individuales de SiO_4^{4-} , a 1:2 para el armazón de estructura 3D totalmente polimerizada. Cada átomo de oxígeno contenido en el marco estructural se comparte entre dos átomos de silicio [8].

Debido a que el átomo del carbono y el átomo del silicio son tetravalentes, en una etapa inicial

de la química de polímeros existía dudas sobre la generación de cadenas de átomos de silicio conteniendo átomos de hidrógeno. En 1912 el químico alemán *Alfred Stock* aisló el compuesto silano SiH_4 , cuya estructura es equivalente al metano CH_4 . En teoría la cadena del polisilano debería ser equivalente a la cadena del polietileno, aunque en la práctica los polisilanos fueron compuestos inestables (Fig. 5.2.1). Posteriormente el científico inglés *F.S. Kipping* (1927) publicó su investigación sobre la preparación de un compuesto estable de silicona que involucraba la formación del grupo siloxano (siloxo) Si-O-Si [9].

El silicio y el oxígeno son los elementos más abundantes de la corteza terrestre y también forman parte de gran cantidad de materiales sintetizados por el hombre, tales como las siliconas, cuyo puente Si-O-Si se asemeja a la estructura atómica del cuarzo. En el cuarzo cuatro átomos de oxígeno

9 Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère. p. 20.

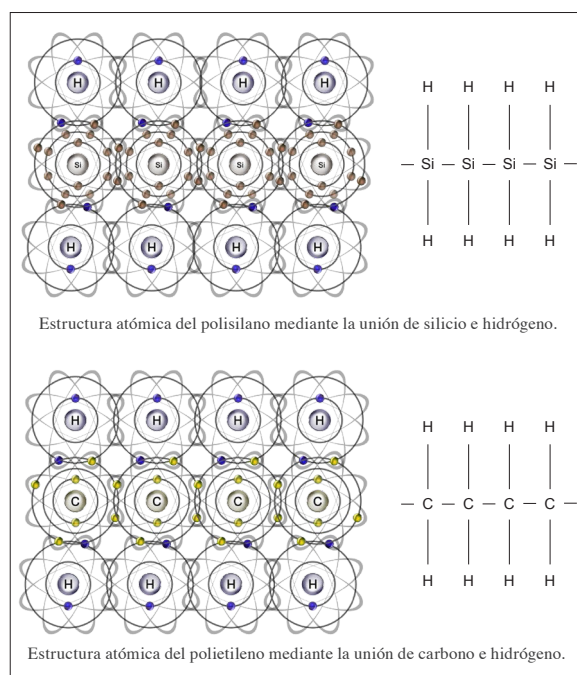


Fig. 5.2.1 Esquema que muestra la presencia de silicio en la estructura del polisilano del mismo modo que el carbono en el polietileno.

7 *Ibidem.* p.599.

8 H. Xu, *Geopolymerisation of Aluminosilicate Minerals*, PhD Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Melbourne, Australia, (2001) p.6.

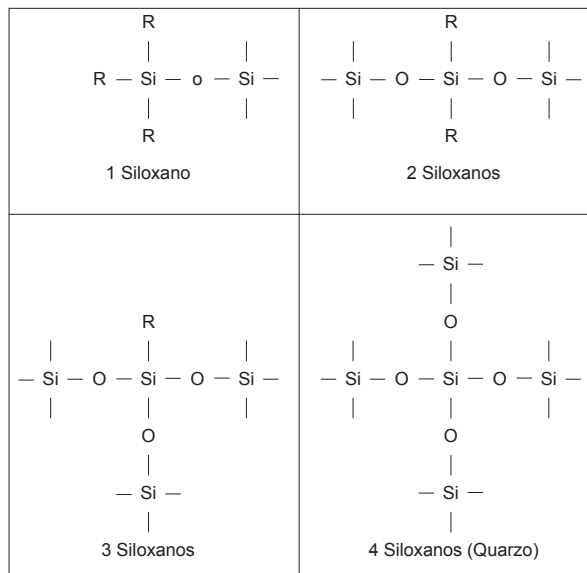


Fig. 5.2.2 Esquema que muestra los tres tipos de siliconas y la estructura química del cuarzo.

están conectados a un átomo de silicio, mientras que en las siliconas puede haber solo uno, dos o tres oxígenos por cada átomo de sílice, y él o los átomos de silicio faltantes son remplazados por uno o más componentes o grupos orgánicos (R). (Fig. 5.2.2) [10].

La posibilidad de interacción entre el silicio, el oxígeno y otros elementos como el aluminio y/o K, Na, Ca, etc. permite la formación de cadenas poliméricas y "geopolímeros".

2.3.2.2 Características poliméricas del aluminio

El átomo de aluminio es anfótero, actúa como ácido o como base según la sustancia con la que reacciona, es decir, puede ser trivalente (en un medio ácido) o tetravalente (en un medio alcalino). Por ejemplo en la caolinita el átomo de aluminio es trivalente $\text{O-Al}(\text{OH})_2$, cuando se convierte en metacaolín luego de la deshidroxilación continúa siendo químicamente trivalente pero se convierte en tetra coordinado con los oxígenos que lo rodean y es químicamente inestable. (Fig. 5.2.3 a) La alcalinización del caolín produce una unidad

de aluminio tetravalente y químicamente estable, tetra coordinado con O y OH (Fig. 5.2.3 b) [11].

El aluminio es un elemento electro positivo como Al^{3+} en combinación con átomos de oxígeno [12]. Durante la polimerización de SiO_4^{4-} , los átomos de aluminio pueden remplazar a los átomos de silicio, y así, la carga negativa incrementará. Por ejemplo $[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$ pasa a $[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]^{5-}$ cuando uno de cuatro átomos de silicio es sustituido por un aluminio [13].

- 11 *Ibidem.* p. 27.
 12 Cox, P. A. (1995). *The elements on earth : inorganic chemistry in the environment*. Oxford University Press. Recuperado en octubre 2017 de: <https://bit.ly/2JWMIR>.
 13 H. Xu, *op cit.*

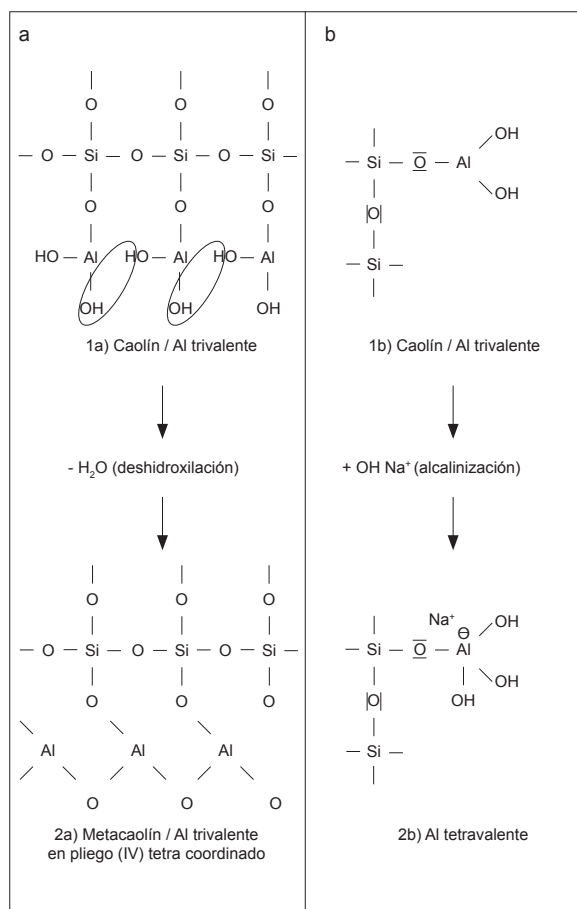


Fig. 5.2.3 Atomo de aluminio trivalente y tetravalente.

2.3.3 ALUMINOSILICATOS LAMINARES: ARCILLAS

Los aluminosilicatos son una gran familia de minerales que contienen óxidos de Al y Si, pero poseen diferencias en estructura cristalina, composición química, densidad, dureza y paragénesis. Davidovits [14] y otros autores clasifican estos grupos según sus estructuras en: estructuras de islas (orto silicato, di silicato), estructuras grupales (silicatos anulares: tri-silicato, tetra-silicato, hexa-silicato), estructuras de cadena (lineales y ramificadas, cinta), estructuras de lámina y sistemas de estructuras (*framework*).

2.3.3.1 Estructuras de lámina

La mica y la arcilla son los dos grupos más grandes en los aluminosilicatos en láminas (Fig.5.3.1). Las estructuras de aluminosilicatos de arcilla son capas compuestas construidas a partir de componentes con cationes coordinados octaédrica y tetraédricamente. La paragénesis de catión de metal más común en minerales de arcilla son Na, K, Ca, Mg y Fe. Los aluminosilicatos de arcilla estructurados en lámina poseen una menor dureza y densidad en comparación con los aluminosilicatos estructurados orto, anillo y cadena [15].

La composición de los minerales de arcilla varía de acuerdo al monto de Si, Al o Mg remplazados por otros cationes, la naturaleza, cantidad de cationes inter lámina y el contenido de agua. Los principales minerales de arcilla son: el grupo de la caolinita, que incluye caolinita, dickita, nacrita y halloysita; el grupo de la Illita, que incluye illita y brammallita; el grupo de la esmectita, incluyendo montmorillonita beidellita, nontronita, hectorita, saponita y sauconita; y la vermiculita [16].

En el contexto de los geopolímeros el mineral más

importante en el grupo de arcillas es la caolinita (Fig.5.3.2). La unidad estructural fundamental de la caolinita es una lámina extendida que se puede considerar que tiene dos constituyentes. Uno es la capa de $(Si_4O_{10})^{4-}$ formada por el enlace de tetraedros de SiO_4 en una matriz hexagonal con las bases de tetraedros SiO_4 aproximadamente coplanar con todos sus vértices apuntando en una dirección. Otro es la capa de $(OH)_6-Al_4-(OH)_2O_4$

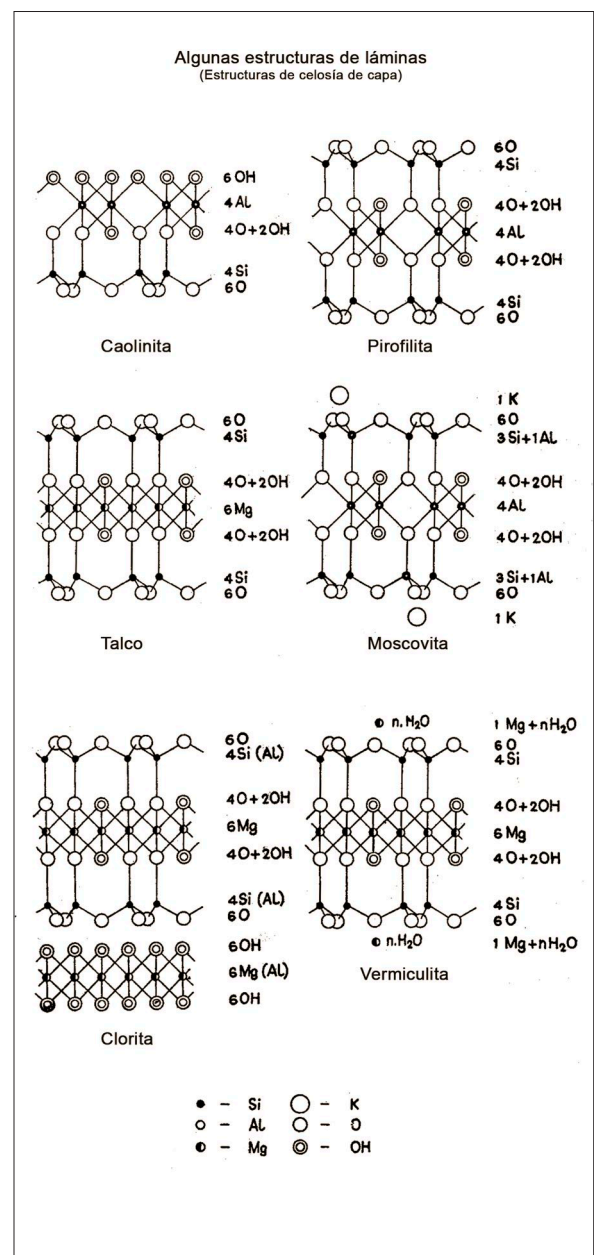


Fig. 5.3.1 Esquema estructural de algunos minerales de arcilla (Estructuras laminares).

14 Davidovits, J. (2015). *op. cit.* p. 38.

15 H. Xu, *op. cit.* p.8.

16 Deer, R. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1997). *Rock-forming minerals*. Vol. 5B, Non-silicates. Geological Society. p.224. Recuperado en octubre 2017 de: <https://bit.ly/2zHQNUW>.

formada sobre los centros de $(Si_4O_{10})^{4-}$ hexágonos por el enlace del octaedro AlO_6 . Solo dos de cada conjunto de tres sitios disponibles están ocupados por iones de Al. Cuando se calienta a $750^{\circ}C$, la caolinita se deforma y transforma en metacaolín; la unidad estructural de Al-O por lo tanto, cambiará de octaédrica (AlO_6) a tetraédrica (AlO_4) [17].

Debido a su característica estructural (1:1 de capa dioctaédrica) eléctricamente 'neutra' la caolinita sin calcinar tiene un área superficial relativamente baja para la reacción de geopolimerización en comparación con la ceniza volante que tiene partículas esféricas reactivas, esto no permite la disolución y 'polimerización' completa por parte del reactivo alcalino y por lo tanto el geopolímero final presenta menor resistencia (Fig. 5.3.3) [18].

17 H. Xu, *op. cit.*

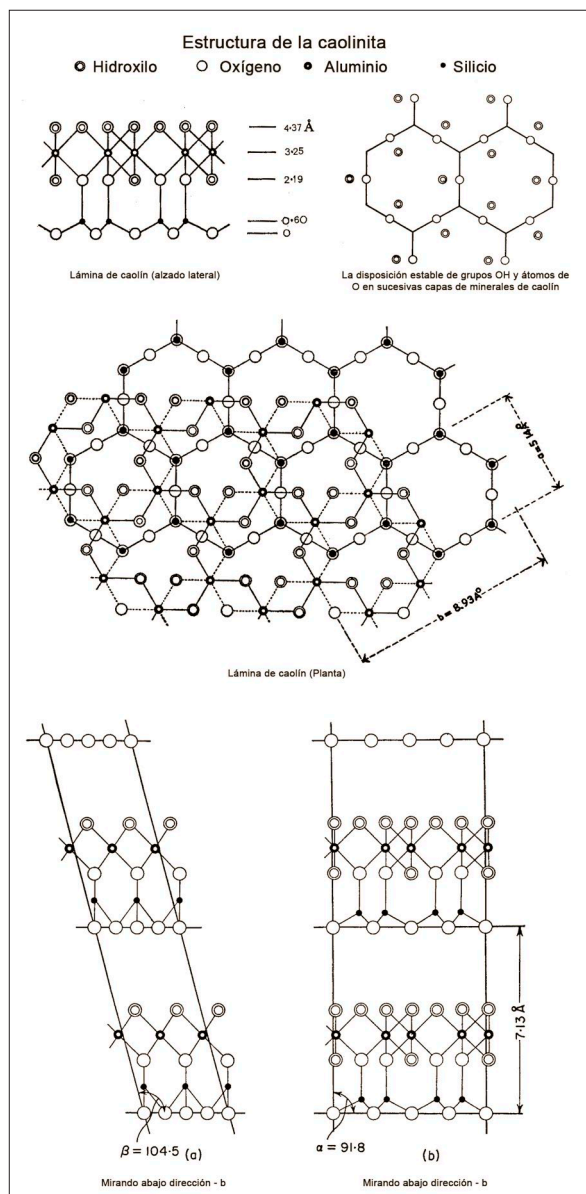


Fig. 5.3.2 Esquema estructural la caolinita.

El método convencional para la producción de geopolímeros a partir de aluminosilicatos naturales propuesto inicialmente por *Josep Davidovits*, involucra la reacción de arcilla caolinítica 'calcificada' (metacaolín), con una solución alcalina, comúnmente de silicato de sodio o potasio. La deshidroxilación preliminar de la caolinita garantiza mayor reactividad de los aluminosilicatos y la formación de geopolímeros de características sobresalientes [19].

Tomando en cuenta lo señalado, un buen número de estudios realizados hasta la fecha se centran en el desarrollo y optimización de geopolímeros a base de metacaolín. Se investigan diferentes factores que intervienen en la geopolimerización, parámetros variables tales como relaciones molares Si/Al y Na/Al, composición de mezclas

18 Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). *op. cit.*

19 Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. CRC Press, Woodhead Publishing, Great Abington, Cambridge, UK. p. 294. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1533/9781845696382>.

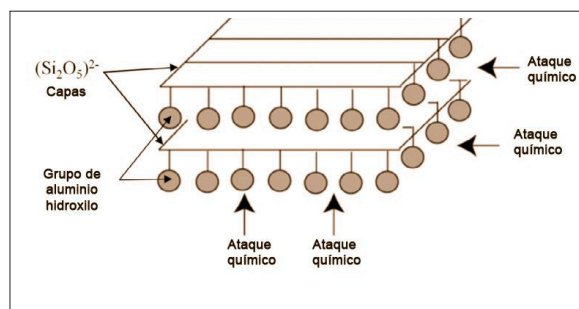


Fig. 5.3.3 Ataque químico de capas de caolinita.

[20], concentración alcalina de la solución de reactivo alcalino [21], solución de silicato [22], rol del agua [23], fase de curado, etc. Esto ha convertido a la caolinita ('térmicamente activada') en el mineral de arcilla más utilizado en la síntesis de geopolímeros.

2.3.4 REACTIVIDAD DE LAS ARCILLAS

Las características de los geopolímeros están directamente afectadas por factores tales como la distribución y tamaño de partícula, el contenido de aluminosilicatos en fase amorfa reactiva y la cantidad de sílice en los materiales precursores [24]. La calcinación de las arcillas constituye el método más generalizado utilizado hasta la actualidad para garantizar la resistencia final de geopolímeros a base de aluminosilicatos naturales, sin embargo, éste método no es el único. Existen varias alternativas químicas, orgánicas [25] y físicas [26] para modificar las características

reactivas de las arcillas sin calcinar [27].

2.3.4.1 Efectos por tratamiento térmico

El tratamiento térmico de arcillas comunes generalmente provoca deshidroxilación de los minerales arcillosos en un rango de temperatura entre 500 y 800 °C, dependiendo del tipo de mineral de arcilla y de la estructura de la lámina octaédrica [28]. Esto transforma las fases cristalinas en fases metaestables que influyen en las propiedades resistentes de los geopolímeros. Por ello, los geopolímeros que son producidos a partir de materias primas que han pasado por un tratamiento de calcinación previa, como es el caso del metacaolín, presentan excelentes características resistentes [29].

En el caso de la caolinita sometida a tratamiento térmico, los iones hidroxilo, fuertemente unidos en la capa constitutiva de aluminio, sufren deshidroxilación por la pérdida de agua a 550-800°C [30]. Esto transforma la caolinita en metacaolín, una sustancia metaestable con mayor reactividad y con una estructura estratificada más abierta que la de la caolinita cruda [31]. Además, los iones de aluminio hexa coordinados de la caolinita, que se convierten en iones penta y tetra coordinados como resultado de un nuevo arreglo atómico, modifica la capa hexagonal de caolinita. El grado de conversión del ión de aluminio hexa coordinado en iones de aluminio penta y tetra

20 Tironi, A., Castellano, C. C., Bonavetti, V., Trezza, M. A., Scian, A. N., & Irassar, E. F. (2015). *Blended Cements Elaborated with Kaolinitic Calcined Clays*. *Procedia Materials Science*, 8, 211–217. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.066>.

21 Liew, Y. M., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, et. al.. (2011). *Influence of solids-to-liquid and activator ratios on calcined kaolin cement powder*. *Physics Procedia*, 22, 312–317. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.049>.

22 Auteif, A., Joussein, E., Gasgnier, G., & Rossignol, S. (2013). *Role of the silica source on the geopolymerization rate: A thermal analysis study*. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 366(1), 13–21. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.01.034>.

23 Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., & Yue, C. (2009). *Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer*. *Applied Clay Science*, 43(2), 218–223. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2008.09.003>.

24 Ruiz-Santaquiteria, C., Fernández-Jiménez, A., Skibsted, J., & Palomo, A. (2013). *Clay reactivity: Production of alkali activated cements*. *Applied Clay Science*, 73(1), 11–16. p. 11. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2012.10.012>.

25 Bergaya, F., Theng, B. K. G., & Lagaly, G. (2006). *Chapter 7: Modified Clays and Clay Minerals*. *Developments in Clay Science*, 1(C), 261. Recuperado en octubre 2017 de: [http://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01007-X](http://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01007-X).

26 Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G. L., Djétéli, G., & Blanchart, P. (2013). *Kaolin-based geopolymers: Effect of mechanical activation and curing process*. *Construction and Building Materials*, 42, 105–113. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.069>.

27 Mackenzie, K. J. D. (2009). *Utilisation of non-thermally activated clays in the production of geopolymers*. In *Geopolymers* (pp. 294–314). Recuperado en octubre 2017 de: Elsevier. <http://doi.org/10.1533/9781845696382.2.294>.

28 Heller-Kallai, L., 2006. *Thermally modified clay minerals*. In: Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G. (Eds.), *Handbook of Clay Science*. *Developments in Clay Science*. Elsevier, Amsterdam, pp. 289–308.

29 Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). *op. cit.* pp.598.

30 Ilic BR, Mitrovic AA, Milicic LR. *Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin*. *Hem Ind* 2010;64:351–6.

31 Liew, Y. M., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A. M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C. M., & Heah, C. Y. (2012). *Processing and characterization of calcined kaolin cement powder*. *Construction and Building Materials*, 30, 794–802. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.079>.

coordinados refleja la reactividad del metacaolín. La reactividad máxima del metacaolín se adquiere cuando el ion de aluminio hexa coordinado es mínimo [32].

Si bien el tratamiento térmico de las arcillas favorece el desempeño final de los geopolímeros, el sobre calentamiento puede ser perjudicial, por ejemplo, la caolinita calcinada a más de 900°C genera geopolímeros de baja resistencia [33]. Pese a que se ha determinado que la temperatura óptima de calcinación es 800°C durante 2 horas, se ha demostrado que la temperatura de calcinación del caolín por si sola no tiene un efecto primordial sobre la resistencia de los geopolímeros, el efecto de la temperatura de calcinación se hace prominente a medida que la relación Si/Al aumenta de 1,40 a 1,54 [34].

También se ha demostrado que otros minerales de arcilla, por ejemplo la illita e illita-esmectita, térmicamente tratadas obtienen características reactivas que favorecen su geopolymerización y que la temperatura óptima de calcinación depende de la composición de las arcillas [35].

De cualquier manera, las arcillas deshidroxiladas se disuelven más fácilmente en medios alcalinos que las arcillas crudas debido a que las fases amorfas presentan mayor reactividad [36]. Se

podría esperar que cualquier otro método que produzca un efecto similar al de la acción térmica en la estructura mineral tenga un efecto beneficioso sobre la reacción de geopolymerización [37].

2.3.4.2 Alternativas de tratamiento químico

Las arcillas pueden ser tratadas químicamente con soluciones ácidas y alcalinas para modificar sus características estructurales. Una de las modificaciones químicas más comunes de la arcilla es la activación con soluciones minerales ácidas, usualmente ácido sulfúrico (H₂SO₄) o clorhídrico (HCl) [38]. La activación de minerales de arcilla mediante ácidos se ha usado por décadas en laboratorios y aplicaciones industriales [39].

El tratamiento de modificación preliminar de las arcillas mediante tratamientos químicos es una alternativa al tratamiento térmico, por ejemplo, el tratamiento mediante ácidos se cree que es uno de los enfoques prometedores que puede reducir la energía necesaria para amplificar las características reactivas de los aluminosilicatos de minerales de arcilla [40].

2.3.4.3 Interacciones orgánicas

Las arcillas pueden reaccionar con diferentes compuestos orgánicos, por ejemplo, los caolines pueden absorber componentes orgánicos en los espacios inter laminares, y los minerales de arcilla de estructura 2:1 son susceptibles a diferentes tipos de reacciones; la interacción con elementos y compuestos orgánicos, polímeros y proteínas pueden modificar las características y comportamiento de las arcillas [41].

32 Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). *op. cit.*

33 Guo, W., Wu, G., Wang, J., Wen, Z., & Yin, S. (2008). *Preparation and performance of geopolymers*. Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, 23(3), 326–330. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/s11595-007-3326-0>.

34 Kong DLY, Sanjayan JG, Sagoe-Crentsil K. *Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures*. J Mater Sci 2008;43:824–31.

35 Seiffarth, T., Hohmann, M., Posem, K., & Kaps, C. (2013). *Effect of thermal pre-treatment conditions of common clays on the performance of clay-based geopolymeric binders*. Applied Clay Science, 73(1), 35–41. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.010>.

36 Granizo, M.L., Blanco-Varela, M.T., Palomo, A., 2000. *Influence of the starting kaolin on alkali-activated materials based on metakaolin*. Study of the reaction parameters by isothermal conduction calorimetry. Journal of Materials Science 35, 6309–6315.

37 Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers : structure, processing, properties and industrial applications*. Woodhead. p 302.

38 Bergaya, F., Theng, B. K. G., & Lagaly, G. (2006). *op. cit.*

39 *Ibidem*.

40 Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). *op. cit.* p 308.

41 Lagaly, G., Ogawa, M., & Dékány, I. (2006). Chapter 7.3 *Clay Mineral Organic Interactions*. *Developments in Clay Science*, 1, 309–377. Recuperado en octubre 2017 de: [http://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01010-X](http://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01010-X).

2.3.4.4 Tratamiento por trituración mecánica

La trituración mecánica puede modificar la estructura cristalina de los minerales de arcilla, reducir el tamaño de partícula, modificar los enlaces Al-OH y Al-O-Si, provocar la conversión del ion de aluminio hexa coordinado en iones de aluminio penta y tetra coordinados y tener un efecto similar al de deshidroxilación térmica en la estructura de la caolinita u otras arcillas [42].

Para este fin existen diversos tipos de molinos que van desde molinos de bolas a molinos vibratorios y planetarios. Hay una variación considerable en la cantidad de energía transferida a la muestra por los diferentes molinos, siendo el más destacado el tipo vibratorio [43].

2.3.5 DISOLUCIÓN DE ALUMINOSILICATOS DE ARCILLA

Las arcillas naturales generalmente son poco reactivas al ataque de ácidos o álcalis en comparación con arcillas que han pasado por un proceso de deshidroxilación. De todos modos, Al-O y Si-O son solubles en soluciones altamente alcalinas pero los porcentajes de disolución de ambas especies son considerablemente diferentes (Fig. 5.5.1). La reactividad de un mineral de arcilla está influenciado por el grado de sustitución en sus láminas tetraédricas. Los minerales que tienen un grado alto de sustitución Si-Al tetraédrico muestran mayores índices de lixiviación en ácido. La cristalinidad y el tamaño de partícula de las arcillas también influencia su reactividad hacia la lixiviación [44].

La disolución de aluminosilicatos depende de las cargas del aluminio y el silicio, así como de la concentración del ion hidróxido, la fuerza iónica y temperatura. En general los aluminosilicatos son menos solubles en medios alcalinos que en medios

42 Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). *op. cit.* pp 306.

43 *Ibidem.*

44 Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *op. cit.* p.302.

GEO-POLÍMEROS A BASE DE ARCILLAS
 DISOLUCIÓN DE ALUMINOSILICATOS DE ARCILLA

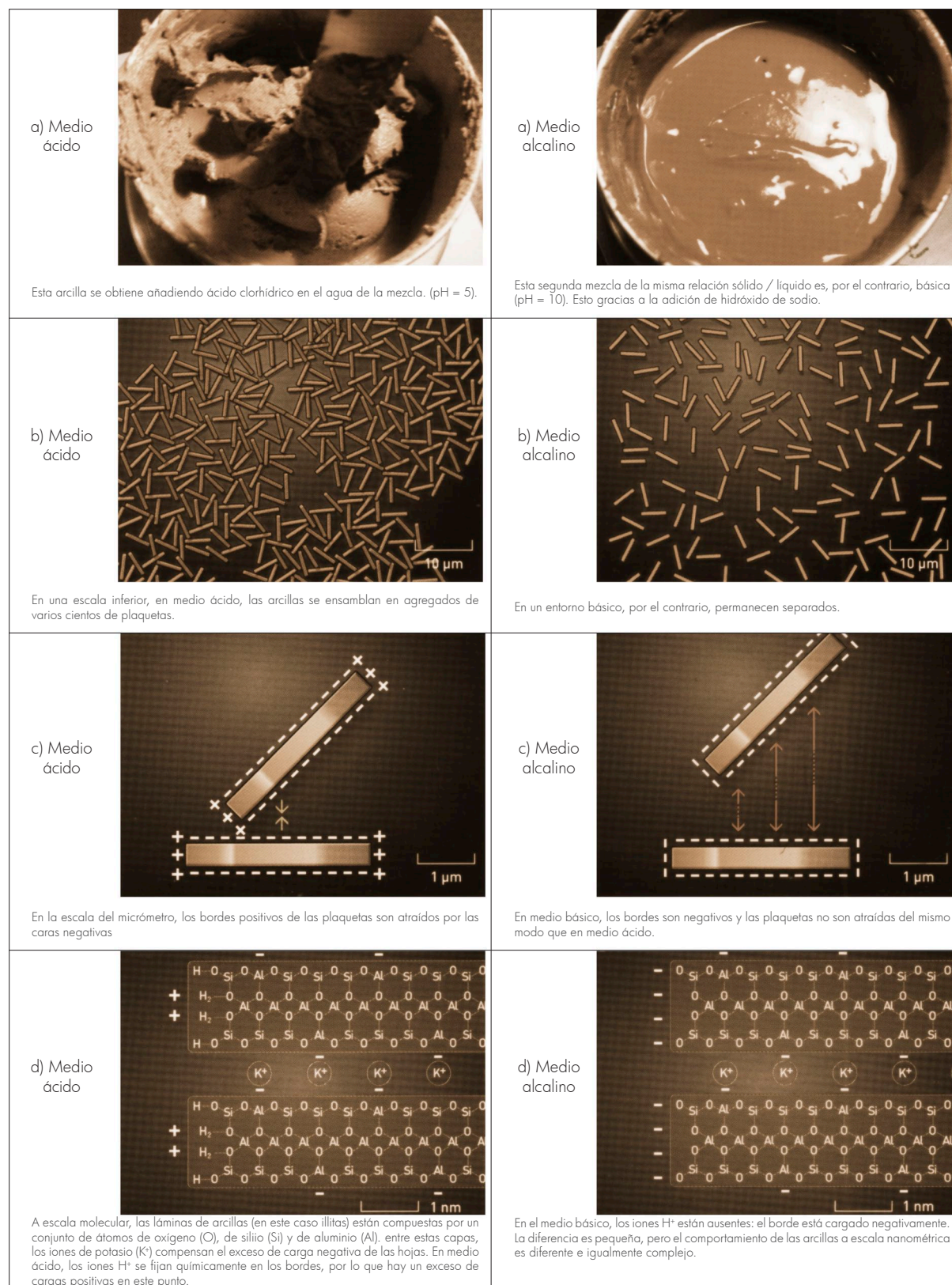


Fig. 5.5.1 Esquema elemental de la acción de ácidos (izquierda) y alcalinos (derecha) en el comportamiento de las arcillas.

ácidos [45].

La disolución de silicio en soluciones con *pH* menor que 7 difiere de soluciones con *pH* sobre 7 porque los cambios que ocurren en horas en *pH* 2 están completos en minutos o segundos con *pH* 8-9; las unidades o partículas poliméricas en *pH* mayor que 7 continúan creciendo a diámetros mayores dependiendo de la temperatura. Los tetraedros SiO_4 en tectosilicatos pueden ser remplazados por tetraedros AlO_4 para formar tectoaluminosilicatos [46].

2.3.6 INVESTIGACIONES DESTACADAS

A continuación se hace un compendio de experiencias y conclusiones derivadas de estudios referentes al uso de arcillas naturales para la elaboración de materiales alcalinamente activados. Así, tomando en cuenta nuestro universo de trabajo y el interés en reducir la energía incorporada del material final, se han obviado los experimentos realizados con arcillas que han sido sometidas a un tratamiento preliminar de deshidroxilación mediante exposición a temperatura y experimentos de mezclas con fuentes ricas en aluminosilicatos reactivos tales como cenizas volantes, escorias, metacaolín, etc. Debido a la extensión del campo de estudio y a que la resistencia mecánica ha constituido una barrera para los materiales a base de arcilla natural, este apartado está enfocado en los factores que influyen en la resistencia a compresión de geopolímeros de arcilla natural.

El estado del arte se reduce a pocos experimentos que, bajo condiciones específicas, evidencian el posible uso de arcillas naturales para la elaboración de materiales alcalinamente activados. Las experiencias recogidas son de gran importancia para establecer pautas previas al diseño experimental. Los experimentos seleccionados son los siguientes:

2.3.6.1 Uso de caolinita no tratada térmicamente

Un estudio publicado por *Esaifan, M., et al.* (2015) [47] expone un experimento basado en la activación alcalina (con NaOH) de arcillas no tratadas térmicamente. Los materiales precursores utilizados fueron arcilla caolínica y arena de sílice. Inicialmente el tamaño de partícula de la arcilla fue escogido mediante trituración y clasificación, obteniendo un 95% de partículas menores a 20 micras. Se utilizó arena de sílice con un tamaño medio de grano de 260 micras como material de relleno.

Se probaron diferentes mezclas que fueron comprimidas a una presión de 15MPa. Los especímenes desmoldados se curaron durante 24h a 80°C utilizando un horno ventilado. El curado, por debajo de la temperatura de ebullición del agua evita la presión de vapor que podría alterar la muestra.

Después del curado inicial los especímenes se dividieron en tres grupos: uno secado a 40°C durante 7 días para evaluar posteriormente la resistencia a la compresión en seco (*S dry*), los especímenes del grupo 2 se sumergieron en agua desmineralizada a temperatura ambiente durante 7 días (*S soaked*) y los del grupo 3 se sometieron a tres ciclos de inmersión-secado, siendo un día sumergidos en agua desmineralizada a temperatura ambiente, seguido de un día de secado a temperatura de 40°C, y un día de inmersión (*S cycled*) previo a las pruebas de resistencia.

Se concluyó que para iniciar el proceso de activación de álcalis es necesario el curado a temperaturas entre 40 y 100°C. La caolinita reacciona con NaOH para formar 'hidroxisodalita' básica tetrahidratada $\text{Na}_8[\text{AlSi}_4\text{O}_{16}](\text{OH})_2 \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$. La resistencia a la compresión óptima se obtiene utilizando una cantidad de NaOH que convierte

45 Xu, H. (2000). *op. cit.* p. 12.

46 *Ibidem.* pp. 14-16.

47 Esaifan, M., Rahier, H., Barhoum, A., Khoury, H., Hourani, M., & Wastiels, J. (2015). *Development of inorganic polymer by alkali-activation of untreated kaolinitic clay: Reaction stoichiometry, strength and dimensional stability*. *Construction and Building Materials*, 91, 251-259. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.034>.

aproximadamente el 50% de la caolinita en hidroxisodalita y una proporción de agua de mezcla justo por debajo del límite plástico. La resistencia óptima obtenida es de 48MPa para muestras secas, 22MPa para las muestras húmedas después de sumergir en agua y 20MPa para las muestras húmedas después de ciclos alternos de secado y almacenamiento de agua (Fig. 5.6.1).

La hidroxisodalita producida se caracteriza por una textura microporosa homogénea y actúa como un material aglutinante tanto para caolinita residual, como para rellenos tales como la arena. En comparación con otros sistemas de activación

de álcali, no es necesaria una activación térmica preliminar de la caolinita o la adición de soluciones de silicatos alcalinos.

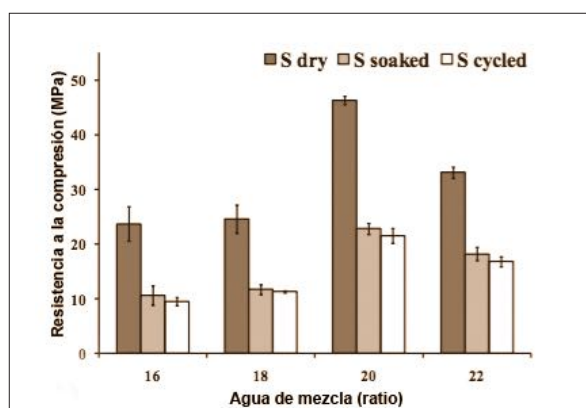
Los factores decisivos en las resistencias obtenidas tienen que ver con las características y proporciones de los materiales precursores, el tamaño de partícula, la fuerza de compresión con la que son fabricadas las muestras y la temperatura de curado.

2.3.6.2 Influencia de la concentración de Na y K

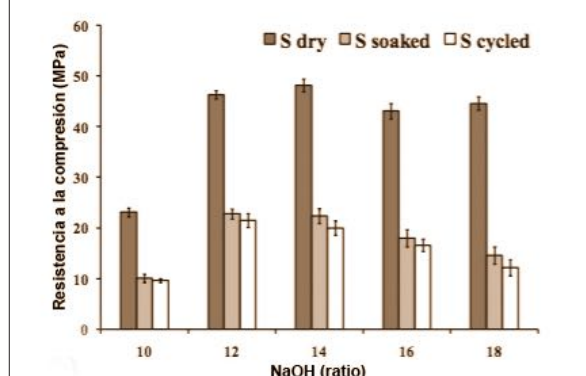
Un estudio publicado por *Ayi D. Hounsi, et al. (2014)* [48] tiene como objetivo investigar la influencia de la concentración de activador alcalino de geopolímeros basados en caolín, en las características resistentes a fuerza de compresión a edad temprana. Se usan activadores alcalinos (Na, K) a concentraciones molares de 4M a 12M, mientras que la relación en volumen de silicato de sodio/Na,KOH se mantiene igual a 0,20 para todas las composiciones. Las muestras se consolidaron por curado a 70°C durante 24 h, y las caracterizaciones mecánicas y estructurales se obtuvieron después de 3 días de envejecimiento. Los resultados muestran que el tipo y la concentración de las soluciones de Na,KOH alcalino influyeron en la cantidad de caolinita activada, las características estructurales, la formación de nuevas fases cristalinas y las resistencias a la compresión en edades tempranas.

La caolinita fue mezclada con la solución alcalina en relación líquido/sólido = 0,25 y amasada durante 5 minutos a 125rpm. La pasta obtenida se puso en un molde y se comprimió con una fuerza de 2.5MPa.

Para todas las composiciones el aumento de la concentración de Na, KOH condujo a una mejora de la resistencia a la compresión a una edad temprana, alcanzando el 88-165% del valor



Resistencia a la compresión de geopolímeros sintetizados usando diferentes proporciones de agua de mezcla y probados en condiciones de sequedad (*S dry*), húmedas (*S soaked*) y sometida a ciclos humedecido-secado (*S cycle*).



Resistencia a la compresión de geopolímeros sintetizados usando diferentes proporciones de NaOH y probados en condiciones secas (*S dry*), húmedas (*S soaked*) y sometida a ciclos humedecido-secado (*S cycle*).

Fig. 5.6.1 Gráficos de resistencia a compresión de geopolímeros.

48 Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G., Djétéli, G., Blanchart, P., Alowanou, D., Kpelou, P., et al. (2014). *How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural characteristic of kaolin-based geopolymers*. *Ceramics International*, 40(7 PART A), 8953–8962. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.02.052>.

estándar de los de los geopolímeros de 4M. Las resistencias a la compresión optimizadas fueron de 25MPa y 32MPa para NaOH=10M y KOH=12M respectivamente (Fig. 5.6.2).

Se concluye que la resistencia a la compresión de los geopolímeros basados en caolín aumenta con el incremento de la concentración alcalina. Para los geopolímeros con Na, el aumento de la concentración de NaOH de 4M a 10M conduce a una mejora del 165% en la resistencia a la compresión. Sin embargo, se observa una

degradación del 47% comparativamente al valor obtenido a 10M cuando la concentración de NaOH se aumenta a 12M. El valor de resistencia a la compresión óptimo de 25MPa se alcanza a 10M de NaOH después de 3 días de envejecimiento.

Cuando se utiliza KOH en lugar de NaOH se observa un aumento continuo de la resistencia a la compresión al aumentar la concentración de KOH de 4M a 12M. Se alcanza un valor de compresión máximo de 32MPa a 12M, lo que corresponde a una mejora del 88% en comparación al valor obtenido para el geopolímero K preparado con la concentración de 4M.

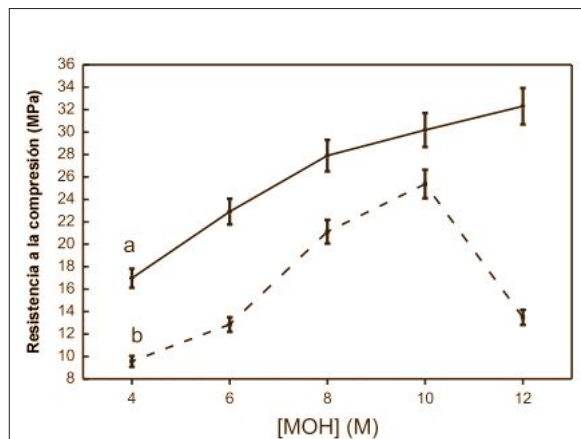
El grado de disolución de la fase de caolín depende del tipo y la concentración de la fase alcalina. La disolución de caolín parece ser mayor con KOH y puede controlar el desarrollo de la resistencia a la compresión.

La formación de especies carbonatadas de Na_2CO_3 y NaHCO_3 debido a la carbonatación atmosférica del hidróxido de sodio o silicato de sodio sin reaccionar es responsable de la degradación de la resistencia a la compresión observada cuando se usa 12M de NaOH.

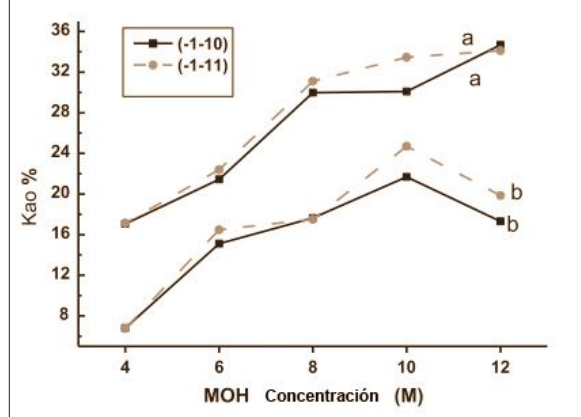
2.3.6.3 Efecto de la activación mecánica y el proceso de curado

El estudio publicado por *Ayi D. Hounsi, et al. (2013) [49]* tuvo como objetivo investigar la influencia de la activación mecánica del caolín crudo en la resistencia a la compresión final de los geopolímeros obtenidos con respecto al proceso de curado empleado. Se utilizó un caolín crudo comercial que contenía un 81,5% en masa de caolín. La activación mecánica se realizó por molienda en seco del caolín crudo a 250 rpm durante 1 h.

Las temperaturas de curado fueron 40°C, 70°C o 100°C durante 24h, 48h o 72h. Las pruebas de



Resistencia a la compresión de geopolímeros frente a la concentración de álcali después de 3 días de envejecimiento (a: geopolímeros con K, b: geopolímeros con Na).



Cantidad de fase disuelta en geopolímeros frente a concentración alcalina. (a) geopolímeros con K (b) geopolímeros con Na.

Fig. 5.6.2 Gráficos de resistencia a compresión de geopolímeros.

49 Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G. L., Djétéli, G., & Blanchart, P. (2013). *op. cit.*

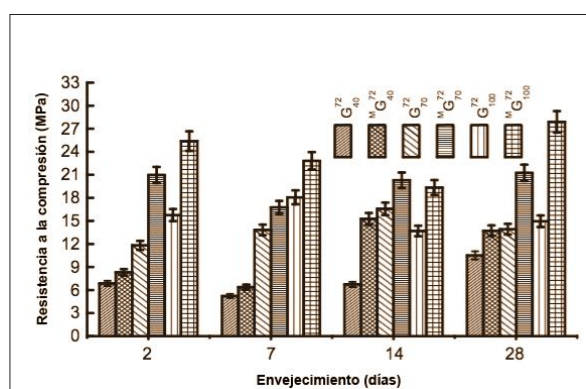
compresión se realizaron en geopolímeros después del segundo, séptimo, decimocuarto y vigésimo octavo día de envejecimiento.

La activación mecánica se realizó con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas. Los resultados mostraron que sin activación mecánica la condición de curado óptimo fue de 24 horas a 70°C y la resistencia a la compresión fue de 15MPa después de 28 días de envejecimiento. Bajo activación mecánica se obtuvo una mejora

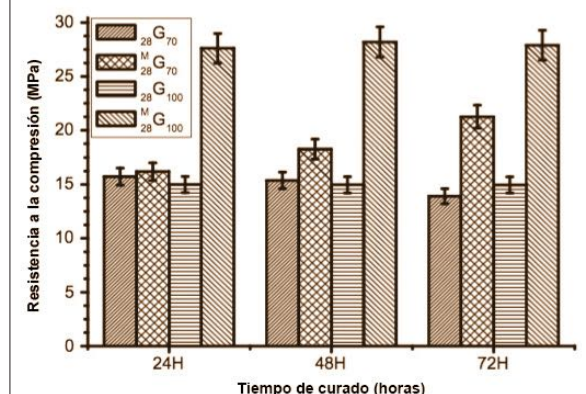
del 35% de la resistencia a la compresión. Con un tiempo de curado de 72 horas a 70°C o con una temperatura de curado de 100°C se observó una mejora del 76% (Fig. 5.6.3).

La solución alcalina se preparó mezclando NaOH 8M con silicato de sodio con ratio (silicato de sodio/NaOH) 0,25. Se dejó reposar por 24h antes de su uso. La solución alcalina se mezcló en un ratio (caolín/solución) de 0,26 y fueron amasados por 5 minutos a 125rpm usando una amasadora mecánica. La pasta obtenida se colocó en moldes comprimiéndola con una fuerza de compactación de 2.5MPa. Luego se sometió a los diferentes procesos de curado.

Cuando se llevó a cabo la activación mecánica sobre el caolín crudo el mejor perfil de curado fue a 100°C durante 24 h. En el caso de geopolímeros basados en caolín sin triturar, también fue necesaria una temperatura moderada de curado de 70°C durante 24h pero la resistencia mecánica se redujo. El curado prolongado a temperatura relativamente alta (100°C) redujo la resistencia a la compresión de estos geopolímeros.



Resistencia a la compresión de los diferentes geopolímeros frente al envejecimiento para las diversas temperaturas de curado durante 72 h.



Resistencia a la compresión de los diferentes geopolímeros frente al tiempo de curado para temperaturas de curado de 70 °C y 100 °C después de 28 días de envejecimiento.

2.3.6.4 Caracterización de caolinita activada

El experimento publicado por *Faten Slaty, et al.* (2013) [50] estudió el efecto de los principales parámetros de síntesis y procesamiento en el desarrollo de la resistencia a la compresión de materiales de construcción a base de caolinita químicamente activada con soluciones de hidróxido de sodio. La resistencia a la compresión y la trabajabilidad de las muestras formadas están influenciadas por las proporciones y propiedades de los componentes de la mezcla de reacción (Fig. 5.6.4 y 5.6.5).

Se obtuvo una resistencia a la compresión de 32 MPa para una mezcla curada a 80°C durante 24h. Los resultados mineralógicos y microestructurales del material endurecido indican la formación

Fig. 5.6.3 Gráficos de resistencia a compresión de geopolímeros.

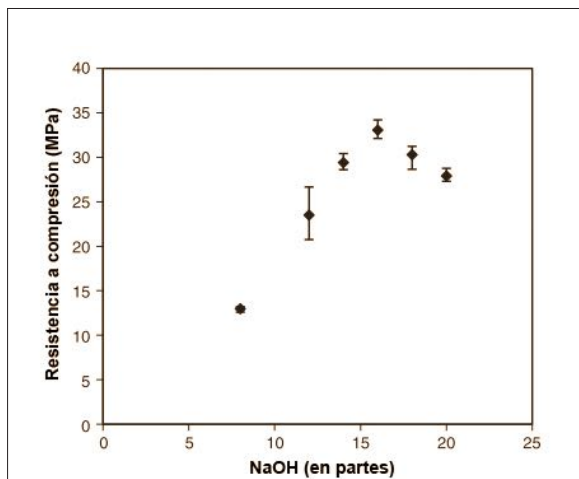
50 Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2013). *Characterization of alkali activated kaolinitic clay*. Applied Clay Science, 75–76, 120–125. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.005>.

de fases de zeolita sódica y feldespatoides con una relación Na/Al de uno. La alta resistencia a la compresión observada está directamente relacionada con la formación de las nuevas fases que llenan los espacios de los poros y unen la matriz.

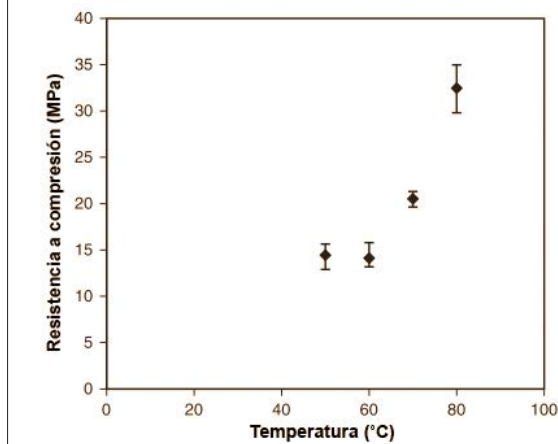
La caolinita se utiliza como fuente de aluminosilicatos y la arena de sílice, con partículas de tamaño entre 90 y 250 micras, como material de relleno. La arcilla utilizada estaba compuesta predominantemente por caolinita y cuarzo además

de una considerable cantidad de moscovita/illita, hematita y posiblemente alunita y glifo. Un aumento del contenido de arena de sílice hasta una relación de uno a uno con respecto a la caolinita ha conducido a mejoras en la manejabilidad de la mezcla y un aumento en la resistencia a la compresión.

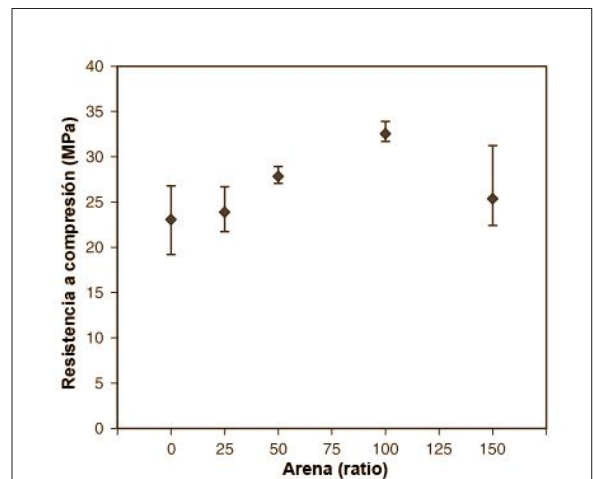
La preparación se realizó en tres pasos. Mezclado: se mezclaron todos los materiales de partida, incluyendo una solución de hidróxido de sodio, por dos minutos a 100rpm.



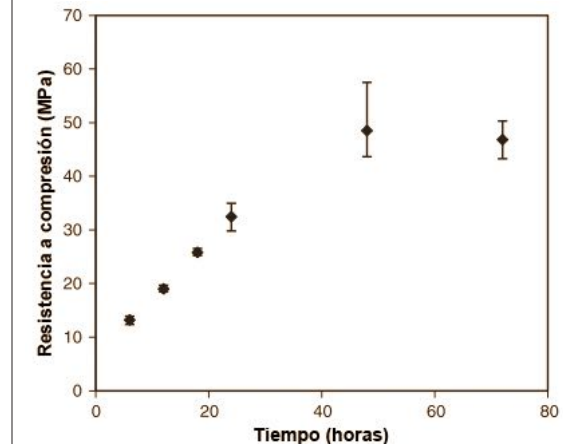
Relación de NaOH vs. resistencia a la compresión. Muestras con composición 100 caolín, 50 arena de sílice, 22 H₂O y curadas durante 24 a 80 ° C.



Temperatura de curado frente a la resistencia a la compresión. Muestras con composición 100 caolín, 100 arena de sílice, 16 NaOH, 22 H₂O y curadas durante 24 h.



Relación de arena vs. resistencia a la compresión. Muestras con composición 100 caolín, 16 NaOH, 22 H₂O y curadas durante 24 a 80 ° C.



Tiempo de curado vs. resistencia a la compresión. Las muestras con composición 100 caolín, 100 arena de sílice, 16 NaOH, 22 H₂O y se curaron a 80 ° C.

Fig. 5.6.4 Gráficos de resistencia a compresión de geopolímeros.

Fig. 5.6.5 Gráficos de resistencia a compresión de geopolímeros.

Compactación: la mezcla fue añadida a moldes y compactada con una presión de 16MPa usando un compresor hidráulico. Curado: se curaron las muestras en un horno ventilado a 80°C por 24 horas.

Optimizando las relaciones y las condiciones de curado se obtuvo una resistencia a la compresión de hasta 48MPa bajo condiciones secas y 23MPa bajo condiciones húmedas.

Se observó que los productos de la reacción cristalina eran fases de aluminosilicato de sodio del grupo zeolítico, concretamente, phillipsita, atrolita e hidroxiparaleína. Estas fases llenan los espacios de los poros y unen la matriz, esto difiere de muchos geopolímeros ya que estas fases contienen agua químicamente unida.

Las experimentaciones citadas demuestran que la arcilla puede ser utilizada como material precursor fuente de aluminosilicatos para geopolimerización. Del estado del arte podemos destacar una serie de factores que influyen directa e indirectamente en la polimerización de arcillas: la influencia del tamaño de partícula de la materia prima, la concentración y tipo de activador alcalino, la compactación del material, las condiciones de curado, etc.

Como se expuso en el apartado 2.3.6.3, la activación mecánica, es decir la "reducción" del tamaño de partícula de la materia prima mediante trituración, ayudó a incrementar el efecto de la solución alcalina y por tanto se reflejó en un mejor comportamiento mecánico de las muestras polimerizadas.

Por otra parte, la concentración del activador alcalino, ya sea NaOH o KOH, repercutió directamente en la resistencia a compresión final de las muestras en todos los experimentos citados. Los mejores resultados se obtuvieron con concentraciones aproximadas a 10M para NaOH y 12M para KOH tal como se señaló en el apartado 2.3.6.2. El uso de concentraciones por encima de 12M para NaOH y 14M para KOH pueden provocar eflorescencias debido a la carbonatación atmosférica del contenido excesivo de activadores alcalinos.

En la mayoría de experimentos citados (apartado 2.3.6.1, 2.3.6.2 y 2.3.6.4) se compactó la mezcla en el proceso de fabricación de probetas, por tanto, se puede concluir que la compactación del material en el proceso de fabricación influye en la resistencia mecánica al modificar la densidad y la estructura porosa del material. Los estudios citados también evidenciaron que el uso de temperaturas de curado entre 80 y 100°C agilitaron el proceso de polimerización y garantizaron la resistencia mecánica de las muestras.

Las arcillas, como nanocompuestos naturales, son susceptibles a modificaciones a nivel molecular. La posibilidad de interacción entre el silicio, el oxígeno y otros elementos como el aluminio, el potasio, el sodio, el calcio, etc. permite la formación de redes y cadenas poliméricas que bajo condiciones específicas, dan lugar a polímeros inorgánicos (geopolímeros).

Si bien las arcillas deshidroxiladas son más susceptibles a polimerización, ya que se disuelven más fácilmente en medios alcalinos debido a que sus fases amorfas presentan mayor reactividad, existen métodos alternativos que producen efectos similares, como por ejemplo: el tratamiento químico, el tratamiento con compuestos orgánicos, y el tratamiento por activación mecánica. Las pautas recolectadas de investigaciones realizadas en lo referente a geopolimerización de arcillas han servido como las bases y criterios rectores para el desarrollo de esta investigación.

Estudio experimental de geopolímeros de arcillas en función de la resistencia mecánica

CAPÍTULO 3

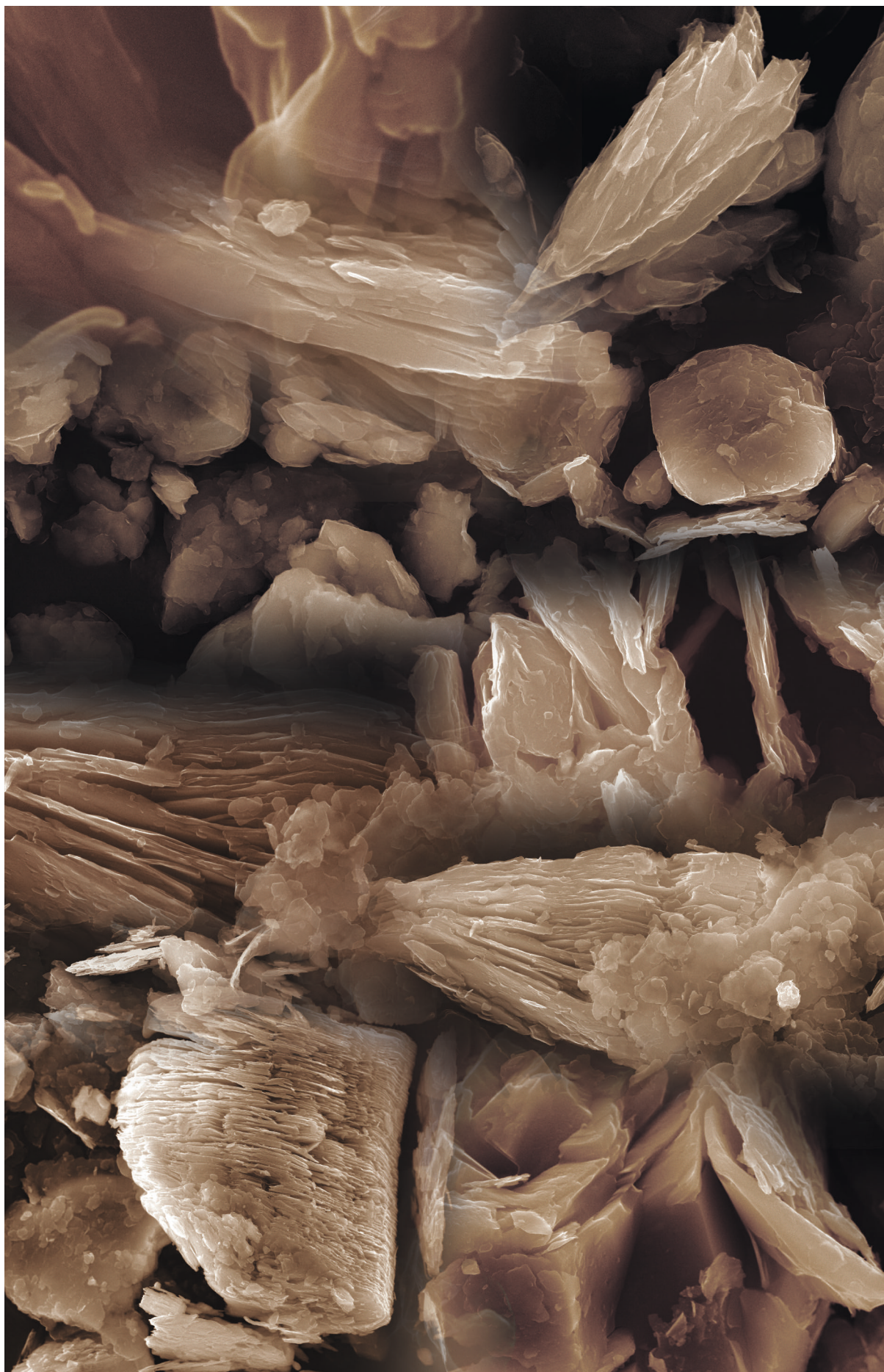


Fig. 6.0.1 Microscopías de arcillas realizadas en la campaña experimental (créditos en apartado: Lista de figuras, imágenes y créditos).

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE GEOPOLÍMEROS DE ARCILLAS EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA

CONTENIDO:

- 3.1 Antecedentes
- 3.2 Objetivos de la campaña experimental

MÉTODOS Y MATERIALES

- 3.3 Consideraciones generales
- 3.4 Elección de materiales de partida
 - 3.4.1 Arena
 - 3.4.2 Agua (H₂O)
 - 3.4.3 Activadores alcalinos
 - Hidróxido de sodio (NaOH)
 - Hidróxido de potasio (KOH)
 - Silicato de sodio (Na₂SiO₃)
 - 3.4.4 Otros aditivos para pruebas piloto
 - Óxido de Calcio
 - Plastificantes
 - 3.4.5 Arcillas
- 3.5 Caracterización de las arcillas
 - 3.5.1 Caracterización de arcilla Tipo A
 - 3.5.1.1 Determinación del límite líquido y del límite plástico de arcilla Tipo A
 - 3.5.1.2 Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo A
 - 3.5.1.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo A
 - 3.5.1.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo A
 - 3.5.1.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo A
 - 3.5.1.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo A
 - 3.5.1.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo A
 - 3.5.2 Caracterización de arcilla Tipo B
 - 3.5.2.1 Determinación del límite líquido y del límite plástico de arcilla Tipo B
 - 3.5.2.2 Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo B
 - 3.5.2.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo B
 - 3.5.2.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo B
 - 3.5.2.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo B
 - 3.5.2.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo B
 - 3.5.2.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo B
 - 3.5.3 Caracterización de arcilla Tipo C
 - 3.5.3.1 Determinación del límite líquido y del límite plástico de arcilla Tipo C
 - 3.5.3.2 Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo C
 - 3.5.3.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo C
 - 3.5.3.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo C
 - 3.5.3.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo C
 - 3.5.3.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo C
 - 3.5.3.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo C
 - 3.5.4 Caracterización de arcilla Tipo D

- 3.5.4.1 Determinación del límite líquido y del límite plástico de arcilla Tipo D
- 3.5.4.2 Información suministrada por el distribuidor de arcilla Tipo D
- 3.5.4.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo D
- 3.5.4.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo D
- 3.5.4.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo D
- 3.5.4.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo D
- 3.5.4.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo D
- 3.5.5 Comparación de los diferentes tipos de arcillas
- 3.6 Diseño de experimentos
 - 3.6.1 Campaña experimental A (GEO-A)
 - 3.6.2 Campaña experimental B (GEO-B)
 - 3.6.3 Campaña experimental C (GEO-C)
 - 3.6.4 Campaña experimental D (GEO-D)
 - 3.6.5 Campaña experimental E (GEO-E)
 - 3.6.6 Campaña experimental F (GEO-F)
 - 3.6.7 Pruebas piloto

RESULTADOS

- 3.7 Resultados de los análisis de resistencia mecánica
 - 3.7.1 Resistencia a compresión y flexión: Campaña experimental A (GEO-A)
 - 3.7.2 Resistencia a compresión y flexión: Campaña experimental B (GEO-B)
 - 3.7.3 Resistencia a compresión y flexión: Campaña experimental C (GEO-C)
 - 3.7.4 Resistencia a compresión y flexión: Campaña experimental D (GEO-D)
 - 3.7.5 Resistencia a compresión y flexión: Campaña experimental E (GEO-E)
 - 3.7.6 Resistencia a compresión y flexión: Ensayos complementarios
- 3.8 Análisis de la influencia de variables en la resistencia a compresión en polímeros a base de arcilla Tipo A
 - 3.8.1 Análisis factorial - Campaña GEO-A
 - 3.8.2 Análisis factorial - Campaña GEO-B
 - 3.8.3 Influencia de la arena
 - 3.8.4 Influencia del agua
 - 3.8.5 Influencia de la concentración y tipo de activador alcalino
 - 3.8.6 Influencia de la adición de silicato de sodio
 - 3.8.7 Influencia de la temperatura y tiempo de exposición
 - 3.8.8 Influencia de la adición de cal
 - 3.8.9 Influencia de otros aditivos
 - 3.8.10 Formulación óptimas en función a la resistencia a compresión
- 3.9 Análisis del comportamiento de diferentes arcillas ante geo-polimerización alcalina
- 3.10 Análisis complementarios de geo-polímeros a base de arcilla Tipo A
 - 3.10.1 Composición: Análisis por difracción de rayos X (DRX)
 - 3.10.2 Análisis termogravimétrico (ATG)
 - 3.10.3 Estructura: Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM)
 - 3.10.4 Estructura porosa - Porosimetría por inyección de mercurio.
 - 3.10.5 Estructura porosa - Porosidad (método convencional)
 - 3.10.6 Absorción de agua por capilaridad
 - 3.10.7 Permeabilidad al vapor de agua
 - 3.10.8 Módulo de Young
 - 3.10.9 Durabilidad
 - 3.10.10 Lixiviación
 - 3.10.11 Comportamiento térmico
- 3.11 Análisis del impacto ambiental
 - 3.11.1 Análisis del comportamiento ambiental de los bloques de arcilla polimerizada
 - 3.11.2 Comparación con productos de construcción similares

3.1 ANTECEDENTES

La campaña experimental se enfocó en el estudio de materiales experimentales de arcilla polimerizada mediante procedimientos análogos a la geopolimerización. La revisión bibliográfica preliminar constituyó un factor determinante en la selección de criterios rectores. Las experiencias y aportaciones de otros autores, recogidas en el marco teórico, fueron útiles para delimitar variables y parámetros tales como: las características y tipo de materiales precursores, los procedimientos experimentales, el rol de la concentración y el tipo de solución alcalina, el rol de la temperatura, las características de curado y los ensayos complementarios.

Es importante aclarar que el campo de investigación y experimentación sobre arcillas en procesos de polimerización es muy amplio, por tanto no es

posible abarcarlo en su totalidad con los recursos destinados a esta investigación. Pese a ello, esta campaña experimental constituye un avance en el estudio de materiales de construcción fabricados a partir de arcillas naturales polimerizadas (sin someter a las arcillas a tratamientos térmicos preliminares), aportando datos e incógnitas relevantes para investigaciones futuras.

El desarrollo de esta campaña experimental se dividió en dos partes: metodología y resultados. La parte de metodología (métodos y materiales) incluye: la normativa que se utiliza como referencia (apartado 3.3), la descripción de los materiales precursores seleccionados (apartado 3.4), la caracterización de las arcillas (apartado 3.5) y el diseño de experimentos (apartado 3.6). En el Anexo 4.0 se incluye un apartado con la descripción de los análisis y ensayos que se llevaron a cabo y en el Anexo 5.0 un apartado que expone los procedimientos experimentales y equipos utilizados.

La sección de resultados contiene: resultados de resistencia a compresión y flexión (apartado 6.7), análisis de la influencia de variables en función de la resistencia a compresión (apartado 6.8), análisis del comportamiento de diferentes arcillas (apartado 6.9), análisis complementarios (apartado 6.10) y el análisis del impacto ambiental de bloques de arcilla polimerizada (apartado 6.11).

En total se diseñaron 154 mezclas de "geopolímeros de arcilla" con las que se fabricaron un total de 462 probetas que fueron sometidas a ensayos de resistencia a compresión y flexión simple. También se realizaron otros análisis de caracterización que se detallan en el Anexo 4.0). La campaña experimental se desarrolló en el laboratorio de materiales de la *Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (EPSEB)*. Análisis puntuales fueron desarrollados en Departamento de Ciencia de Materiales y Química Física de la *Universitat de Barcelona* y en los *Centres Científics i Tecnològics de la Universitat de Barcelona*; en el *Institute of Earth Sciences Jaume Almera of the Spanish Scientific Research Council (ICTJA-CSIC)* en Barcelona; y en el Departamento de Química de la Universidad de Navarra.

3.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

- Fabricar bloques experimentales de arcilla polimerizada mediante procedimientos análogos a la geopolimerización.
- Analizar la resistencia a compresión y flexión de los bloques experimentales de arcilla polimerizada fabricados.
- Analizar la influencia de variables que intervienen en los procesos de polimerización de los bloques experimentales de arcilla.
- Analizar el comportamiento de cuatro tipos de arcillas ante una misma estrategia de activación alcalina.
- Realizar análisis complementarios de caracterización de los bloques experimentales de arcilla polimerizada.
- Analizar el comportamiento ambiental (energía incorporada en la fase de fabricación) de bloques experimentales de arcilla polimerizada, comparándolos con ladrillos de arcilla cocida y bloques de tierra comprimida (BTC).

MÉTODOS Y MATERIALES

3.3 CONSIDERACIONES GENERALES

Los geopolímeros son materiales relativamente nuevos y por ello no existen normas explícitas para su análisis, fabricación o uso. Tampoco existe una regulación normativa para geopolímeros o polímeros a base de aluminosilicatos de arcillas naturales, por tanto, considerando que en esta campaña experimental la principal materia prima es arcilla, se tomaron como referencia diferentes normas alternativas.

La tabla en la Fig. 6.3.1 contiene un listado de los análisis y normas de referencia para la caracterización de las arcillas (materiales precursores fuente de aluminosilicatos). Las arcillas fueron caracterizadas mediante los siguientes análisis: determinación del límite líquido, determinación del límite plástico, análisis por difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (ATG), análisis por fluorescencia de rayos X (FRX), análisis granulométrico (ADL) y análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

La tabla en la Fig. 6.3.2 contiene un listado de análisis y normas de referencia que han sido adaptadas para la caracterización del material experimental. Todas las probetas fabricadas bajo diferentes condiciones y dosificaciones, tanto en la primera como en la segunda parte experimental, fueron ensayadas a flexión y compresión simple. Además, con el objetivo de determinar las propiedades del material optimizado se realizaron varios análisis de caracterización: difracción de rayos X (DRX), análisis termogravimétrico (ATG), análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM), porosimetría de mercurio, porosidad, densidad

ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PRECURSORES	SIGLAS
Análisis por difracción de rayos X	(DRX)
Análisis por fluorescencia de rayos X	(XRF)
Análisis termogravimétrico	(TG)
Análisis de la distribución de tamaños de partículas mediante difracción láser	(ADL)
Análisis por microscopía electrónica de barrido	(SEM)
OTROS ANÁLISIS	NORMA DE REFERENCIA
Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.	PNE-prEN ISO 17892-12 / UNE 103103:1994
Determinación del límite plástico de un suelo.	PNE-prEN ISO 17892-12 / UNE 103104:1993

Fig. 6.3.1 Análisis y normas de referencia para la caracterización de materiales precursores (arcillas).

ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE "GEO-POLIMERO"	SIGLAS
Análisis por difracción de rayos X	(DRX)
Análisis termogravimétrico	(TG)
Análisis por microscopía electrónica de barrido	(SEM)
Porosimetría por inyección de mercurio (Hg)	(PDM)
OTROS ANÁLISIS	NORMA DE REFERENCIA
Porosidad, densidad aparente y densidad relativa.	UNE-EN 1936:2007
	UNE-EN 772-13 / UNE-EN 1936:2007
Succión capilar	UNE-EN 772-11:2001
	UNE-EN 13755:2008
Permeabilidad al vapor de agua	UNE-EN ISO 12572.
Módulo de elasticidad dinámico	UNE-EN ISO 12680-1:2007
Resistencia a compresión simple	UNE-EN 772-1:2002
Resistencia a flexión	UNE-EN 1015-11:2000/ A1:2007
Determinación de durabilidad	(UNE 41410:2008)
Lixiviación	UNE-EN 12457-4:2003
Comportamiento térmico.	UNE-EN 16755:2018 / UNE- EN 1745

Fig. 6.3.2 Análisis y normas de referencia para la caracterización del "geo-polímero".

aparente y densidad relativa, determinación de la absorción de agua por capilaridad, permeabilidad al vapor de agua, módulo de elasticidad dinámico (MOE), resistencia mecánica, durabilidad, lixiviación y comportamiento térmico. La norma UNE 41410:2008 (Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques (Fig.6.3.3)) también sirve como norma de referencia ya que las probetas fabricadas son conceptualizadas como bloques de arcilla “estabilizada”. Entre los criterios rectores de la campaña se estable que el porcentaje de “estabilizantes” utilizados no sobrepase el porcentaje estipulado en dicha norma.

NORMA UNE 41410:2008 : Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques, Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.	NORMA DE ENSAYO
Ensayo de compresión	UNE 41410:2008
Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: determinación de la resistencia a compresión.	UNE-EN 772-1:2002
Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: determinación de la resistencia inicial a cortante.	UNE-EN 1052-3:2003
Resistencia a ciclos de humectación/secado	UNE 41410:2008
Resistencia a la erosión	UNE 41410:2008
Absorción de agua por capilaridad. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería, en hormigón, piedra natural y artificial, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.	UNE-EN 772-11:2001 y UNE-EN 772-11:2001/A1:2006
Propiedades térmicas. Fábrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar los valores térmicos de proyecto.	UNE-EN 1745:2002.
Permeabilidad al vapor de agua. Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificios. Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua. (ISO 12572:2001).	UNE-EN ISO 12572.
Adherencia. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería.	UNE EN 998-2:2004 UNE-EN 1052-3:2003
Sulfatos (DURABILIDAD). Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 5: Determinación del contenido en sales solubles activas en las piezas de arcilla cocida para albañilería.	UNE-EN 772-5:2002. UNE-EN 772-5:2016
Especificaciones de los BTC para fábrica de albañilería	Normas para la fabricación de bloques
Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 2: Determinación del porcentaje de superficie de huecos en piezas para fábrica de albañilería (por impresión sobre papel).	UNE-EN 772-2:1999 y UNE-EN 772-2:1999/A1:2005
Dimensiones y tolerancias: La determinación de las dimensiones de los BTC se debe hacer de acuerdo con el procedimiento descrito en las Normas.	UNE-EN 772-16:2001, UNE-EN 772-16:2001/A1:2006 y UNE-EN 772-16:2001/A2:2006
Planeidad de superficies: Las caras del bloque deben ser planas. La determinación de la planeidad se hará de acuerdo con las Normas. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 20: Determinación de la planeidad de las caras de piezas para fábrica de albañilería.	UNE-EN 772-20:2001 y UNE-EN 772-20:2001/A1:2006.
Densidad: El fabricante debe declarar la densidad aparente en seco del BTC. La determinación de la misma se hará de acuerdo con la Norma. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 13: Determinación de la densidad absoluta seca y de la densidad aparente seca de piezas para fábrica de albañilería. (excepto piedra natural).	UNE-EN 772-13:2001
Normas para el uso de cal como estabilizante	UNE 41410:2008
Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.	UNE-EN 459-1:2002
Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.	UNE-EN 459-2:2002
Cales para la construcción. Parte 3: evaluación de la conformidad.	UNE-EN 459-3:2002

Fig. 6.3.3 Análisis de referencia según la norma UNE 41410:2008 (Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques).

3.4 ELECCION DE MATERIALES DE PARTIDA

3.4.1 Arena

La arena se utiliza como relleno, mejora la trabajabilidad de la mezcla y aporta indirectamente

resistencia. La arena utilizada fue suministrada por Àrids per a la Indústria i la Depuració, S.L. (Barcelona). Se escogió el siguiente tipo de arena para los ensayos: Arena silícea (Standard) L-105115. Los detalles de su granulometría y composición se exponen en la tabla de la Fig.6.5.1.

Caracterización suministrada por el distribuidor.			
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS			
SiO ₂ (%) ≥ 98.5	Superficie específica NA		
Al ₂ O ₃ (%) NA	AFS 95 / 115		
Fe ₂ O ₃ (%) NA	TE NA		
K ₂ O (%) NA	CU NA		
TiO ₂ (%) NA			
Humedad (%) NA	Perd. Calcinación 950°C (%) NA		
DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA			
Tamiz (µm)	Retenido (%)	Tamiz (µm)	Retenido (%)
> 250	≤ 8		
> 63 < 250*	≥ 89		
< 63	≤ 5		
< 20	≤ 0.9		
* Acumulado en 4 tamices: 63, 90, 125 y 180 µm.			
OTRAS CARACTERÍSTICAS			
Coeficiente de angulosidad: Máximo 1.58			
Demanda de ácido (ml/100g): Máximo 6			
Punto de sinterización: Mínimo 1500 °C			

Fig.6.5.1 Características de la arena. Información suministrada por el distribuidor: Àrids per a la Indústria i la Depuració, S.L.

3.4.2 Agua (H₂O)

Se utiliza agua destilada suministrada por *Adesco S.A. (Barcelona)*.

3.4.3 Activadores alcalinos

Los activadores alcalinos principalmente utilizados fueron hidróxido de sodio y potasio, y silicato de sodio (Tipo A). Estos y otros activadores (Fig.6.5.3) que se utilizaron para pruebas piloto se señalan a continuación:

- Hidróxido de sodio (NaOH)

El hidróxido de sodio utilizado fue suministrado por *LabKem (Barcelona)*. Se escogió el siguiente tipo de hidróxido sódico para los ensayos:

- Sodio hidróxido EPR en microperlas bajo en metales (Ref:SOHY-MOP-5KO).

- Hidróxido de potasio (KOH)

El hidróxido de potasio utilizado fue suministrado por *LabKem (Barcelona)*. Se escogió el siguiente tipo de hidróxido potásico para los ensayos:

- Potasio hidróxido 85% AGR en lentejas ACS, Ph. Eur. (Ref: POHY-POA-5KO).

- Silicato de sodio (Na₂SiO₃)

El silicato de sodio utilizado fue suministrado por *LabKem (Barcelona)* (Tipo A) y se escogió el siguiente tipo de silicato sódico para los ensayos:

- Tipo A: Sodio silicato solución (Na₂O nSiO₂)nH₂O GLR (Ref: SOTS-00P-1KO) CAS: 1344-09-8, EC: 215-687-4.

Assay >99.0%	NaCl <0.01%	As <0.0001%	
Na ₂ CO ₃ < 0,5%	Fe <0.001%	Pb <0.00005%	
Na ₂ SO ₄ < 0.012%	Ni <0.001%	Hg <0.00001%	
Hidróxido de sodio NaOH - Sodio hidróxido EPR en microperlas bajo en metales (Ref:SOHY-MOP-5KO)			
Assay >85.0%	SiO ₂ <0,005%	Fe <0.001%	Mg <0.0005%
CO ₃ (K ₂ CO ₃) < 1,5%	Cl <0.004%	Al <0.001%	Ag <0.0005%
Total N <0.001%	SO ₄ <0.002%	Heavy metals (Pb) <0.001%	
PO ₄ <0.001%	Ni <0.0005%	Ca <0.001%	
Hidróxido de potasio (KOH) - Potasio hidróxido 85% AGR en lentejas ACS, Ph. Eur. (Ref: POHY-POA-5KO)			
Insol. in filtrated water glass >0.02%	SiO ₂ Na ₂ O > 39%	Density at 20°C: 1.45 - 1.48 g/ml	
Insol. sediment water glass >0.1%	Fe ₂ O ₃ <0.01%	Viscosity (20°C) > 100cP	
M. Frac. SiO ₂ /Na ₂ O:2.4 - 2.6	CaO <0,1%		
Silicato de sodio - Tipo A: Sodio silicato solución (Na ₂ O nSiO ₂)nH ₂ O GLR (Ref: SOTS-00P-1KO) CAS: 1344-09-8, EC: 215-687-4.			
Características esenciales	Prestaciones	Especificaciones técnicas	
CO ₂	≤ 4%	UNE-EN-459-1:2011	
CaO + MgO	≥ 90%	UNE-EN-459-1:2011	
Cal útil	≥ 80%	UNE-EN-459-1:2011	
MgO	≤ 5%	UNE-EN-459-1:2011	
Reactividad	R5	UNE-EN-459-1:2011	
Óxido de calcio CL-90Q			

Fig. 6.5.3 Especificaciones técnicas de NaOH, KOH, silicato de sodio y óxido de calcio proporcionado por el distribuidor.

3.4.4 Otros aditivos para pruebas piloto

- Óxido de Calcio

El óxido de calcio ("cal viva") utilizado en algunas pruebas comparativas fue suministrado por *Cales de Pachs S.A. (Barcelona)* (Óxido de calcio CL-90Q).

- Plastificantes

Se hicieron pruebas piloto con plastificantes de hormigón suministrado por *Sika*. Se utilizaron los siguientes productos comerciales:

ViscoCrete 125P, es un superplastificante y reductor de agua de alto rendimiento, en forma de polvo, basado en la tecnología de polímeros de policarboxilato (PCE) *Sika® ViscoCrete®*.

Sikament FF, aditivo superplastificante y gran reductor de agua a base de melamina, para obtener hormigones resistentes y fluidos. Está exento de cloruros.

Sikament 165 ES, aditivo plastificante a base de lignosulfonatos modificados para hormigones fabricados y preparados en plantas de hormigón o en plantas de obra.

3.4.5 Arcillas

La arcilla es utilizada como material base, conglomerante principal y como precursor fuente de aluminosilicatos inorgánicos. Las arcillas utilizadas fueron suministradas por *Argiles Colades S.A. del sector de La Bisbal d'Empordá (Girona-Barcelona)*. Se escogieron aleatoriamente cuatro diferentes tipos de arcillas (Fig.6.5.2) con los siguientes nombres comerciales:

- Arcilla LILA (Arcilla Tipo A);
- Arcilla BEIG PEN/F (Arcilla Tipo B);
- Arcilla ROJA (Arcilla Tipo C);
- Caolín MD-25 (Arcilla Tipo D).

La caracterización de cada tipo de arcilla se expone a continuación

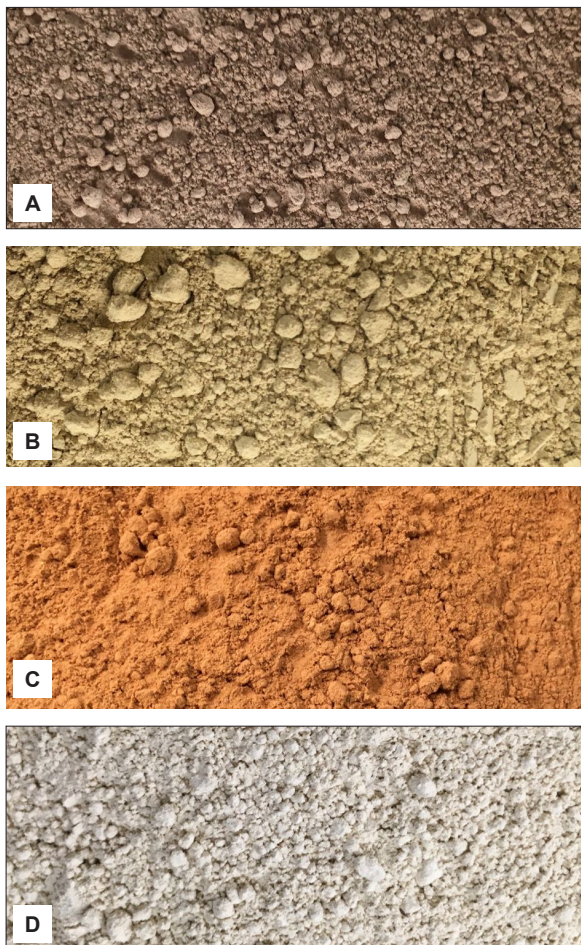


Fig. 6.5.5 Arcillas utilizadas en la campaña experimental. A) Arcilla LILA, B) Arcilla BEIG PEN/F, C) Arcilla ROJA, D) Caolín MD-25.

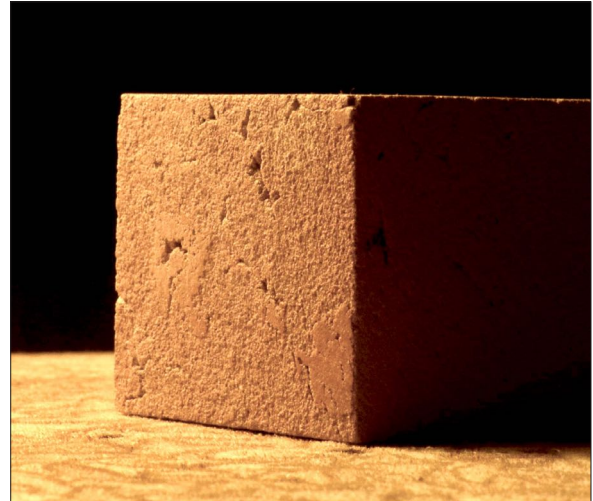


Fig. 6.6.1 Las arcillas pueden ser fuente de aluminosilicatos en procesos de polimerización por activación alcalina: Bloque de arcilla polimerizada fabricado a partir de arcilla Tipo A.

3.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS

La caracterización de los materiales precursores, es decir de las arcillas utilizadas como materia prima para la elaboración de "geopolímeros" (Fig. 6.6.1 y Fig.6.5.5), persiguió dos objetivos principales: por un lado corroborar la información suministrada por el proveedor y por otro obtener datos detallados sobre los distintos componentes y propiedades de las arcillas utilizadas como fuente de aluminosilicatos naturales.

Se caracterizaron las cuatro arcillas seleccionadas (arcillas Tipo A, B, C y D) mediante diferentes análisis: Determinación del límite líquido y determinación del límite plástico, Análisis por difracción de rayos X (DRX), Análisis termogravimétrico (ATG), Fluorescencia de rayos X (FRX), Análisis de la distribución de tamaños de partículas mediante difracción láser (ADL) y Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los resultados de los diferentes análisis llevados a cabo evidenciaron que las características y la composición difieren de una arcilla a otra. A continuación se exponen los análisis de caracterización de las arcillas Tipo A, B, C y D. Las especificaciones técnicas suministradas por el distribuidor de las arcillas se adjuntan en el apartado de Anexos.



Fig. 6.6.1.1.2 Arcilla Tipo A.

INFORMACIÓN DEL DISTRIBUIDOR - GRANULOMETRÍA	
GRANULOMETRÍA (mm)	ARCILLA TIPO A (%)
0,500	0,00
0,300	0,00
0,125	6,13
0,090	6,81
0,063	9,71
0,045	13,53
0,036	36,02
RESTO	27,01

Fig. 6.6.1.2.1 Granulometría suministrada por el distribuidor.

INFORMACIÓN DEL DISTRIBUIDOR - COMPOSICIÓN	
COMPOSICIÓN QUÍMICA	ARCILLA TIPO A
Na ₂ O	0,00
MgO	0,31
Al ₂ O ₃	23,32
SiO ₂	56,53
P ₂ O ₃	0,00
P ₂ O ₅	0,00
SO ₃	0,00
K ₂ O	0,64
CaO	0,40
TiO ₂	0,00
Cr ₂ O ₃	0,00
MnO	0,00
Fe ₂ O ₃	10,39

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA %	ARCILLA TIPO A
Clorita	0,00
Illita	0,00
Caolinita	49,00
Quarz	42,00
Feldespato K	2,00
Plagioclastio	1,00
Guethita	0,00
Hematita	6,00
Calcita	0,00
Dolomita	0,00
Montmorillonita	0,00

Fig. 6.6.1.2.2 Composición suministrada por el distribuidor.

3.5.1 Caracterización de arcilla Tipo A

3.5.1.1 Determinación del límite líquido y determinación del límite plástico

Para la determinación del límite líquido de la Arcilla Tipo A (Arcilla micronizada LILA - Fig. 6.6.1.1.2) se tomó como referencia la norma UNE 103103:1994 y para la determinación del límite plástico la norma UNE 103104:1993. La descripción del ensayo se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Determinación del límite líquido de un suelo por el método de la cuchara de Casagrande y Determinación del límite plástico de un suelo. En la tabla de la Figura (6.6.1.1.1) se exponen los resultados (Detalles - Anexo 6.6.1.1).

LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO (UNE 103-103-94 Y UNE 103-104-93)	
PLASTICIDAD	ARCILLA TIPO A
Límite líquido	34,2
Límite plástico	20,3
Índice de plasticidad	13,9

Fig. 6.6.1.1.1 Límite líquido y límite plástico.

3.5.1.2 Información suministrada por el distribuidor

La granulometría (Fig. 6.6.1.2.1) y la composición química y mineralógica (Fig. 6.6.1.2.2) de arcilla Tipo A fue suministrada por el proveedor: *argiles Colades S.A. del sector de La Bisbal d'Empordà (Girona-Barcelona)*. (Detalles - Anexo 6.6.1.2).

3.5.1.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo A

La descripción del análisis por difracción de rayos X (DRX) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por difracción de rayos X (DRX). Se realizó la DRX de la arcilla tipo A (Arcilla micronizada LILA) tanto de la roca total como de la fracción arcilla. Las DRX de la fracción de arcilla fueron realizadas por el *Dr. Juan Diego Martín Martín del Dpt. Mineralogía, Petrología i Geología Aplicada de la Universitat de Barcelona* (Anexo 6.6.1.3) y se dividen en DRX normal y DRX orientadas. Los resultados de las DRX de la

fracción arcilla se muestran en: a) Interpretación e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación catalogando los minerales (Fig. 6.6.1.3.1 y Fig. 6.6.1.3.2); b) Diagrama DRX secado al aire (normal); y c) Gráfico DRX de los tres diagramas superpuestos (Detalles - Anexo 6.6.1.3).

Los análisis DRX de la fracción de arcilla (Fig. 6.6.1.3.1 y Fig. 6.6.1.3.2) evidencian la presencia de cuarzo, arcillas, calcita y hematita. En lo referente al mineral de arcilla dominante se interpreta que es la caolinita seguida por la illita y la clorita.

Por otra parte se realizó una interpretación complementaria de los resultados de las DRX de la roca total mediante el software *X'Pert HighScore (PANalytical)* (Anexo 6.6.1.3) que evidencia la presencia dominante de cuarzo, caolinita, haloisita y vermiculita.

En ambas interpretaciones se encuentran importantes cantidades de óxido de silicio en el cuarzo, en la caolinita, la hematita y haloisita; óxido de aluminio en la caolinita, la hematita y haloisita. También se detecta la presencia de hierro, magnesio, calcio y agua. Esta información se complementa con los resultados de la fluorescencia de rayos X expuesto más adelante.

Interpretación e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación - Arcilla A

Muestra A	Simbología	Ubicación
Cuarzo	(Q)	3,34 Å - 4,26 Å
Calcita	(Ca)	3,04 Å
Hematita	(Hm)	2,69 Å
Illita	(I)	10 - 5 Å
Caolinita	(K)	7,15 - 3,58 Å
Clorita	(Chl)	14 - 7,10 - 4,72 - 3,54 Å
Feldespato alcalino-potásico	(Fk)	3,25 Å
Plagioclasa: plg	(Plg)	3,19 Å

Caolinita > Illita >> Clorita

Total				Minerales de arcilla		
Q	Ca	Hm	Clay	K	I	Chl
***	*	*	***	***	**	*
(En la roca total de la tabla no se cuantifica los minerales de la arcillas por separado y se ha usado "Clay")				*** Dominante		
				** Abundante		
				* Presente		

Fig. 6.6.1.3.2 Cuadro resumen de interpretación DRX.

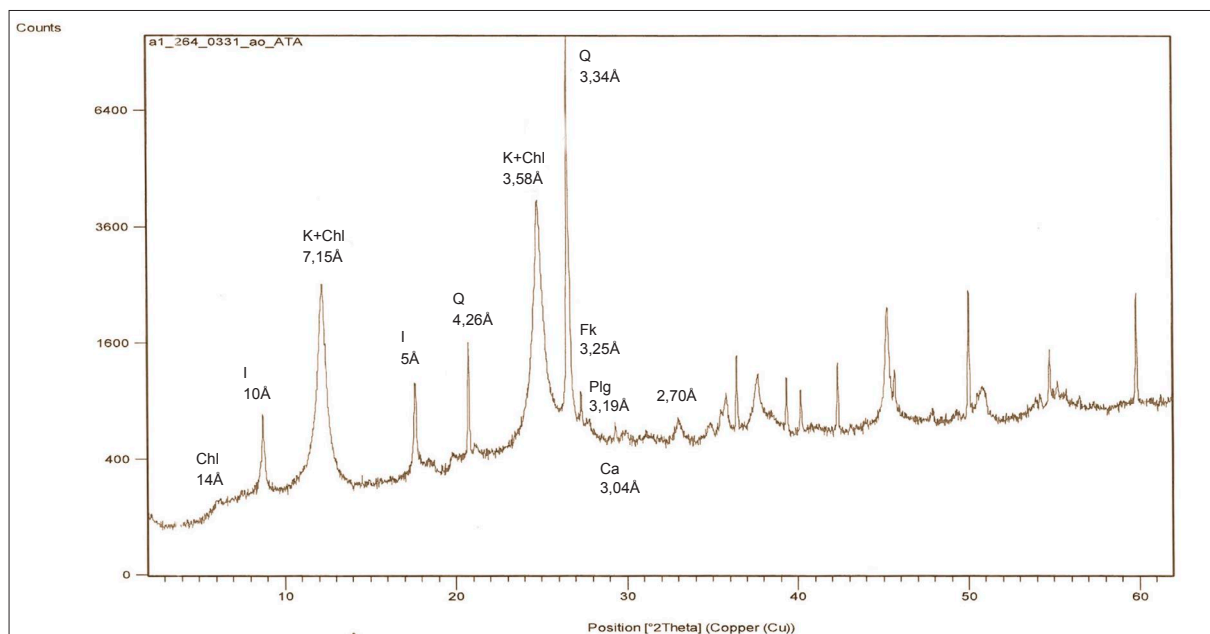


Fig. 6.6.1.3.1 Interpretación de análisis DRX e identificación de los picos de las muestras y los minerales (arcillas) (Dr. Juan Diego Martín).

3.5.1.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo A

El procedimiento de análisis termogravimétrico (ATG) se explica en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos - Análisis termogravimétrico (ATG). El peso de la muestra analizada fue de 24.29mg. El resultado obtenido mediante ATG en aire, la derivada de la pérdida de masa respecto a la temperatura (DTG) y el flujo de calor de peso corregido se muestra en la Figura 6.6.1.4.1 La señal DTG se emplea para establecer los rangos de temperatura en los que tienen lugar las transformaciones.

En la gráfica se observa un primer pico entre los 40 y 50°C y un segundo pico entre la temperatura de 100 y 110°C. Ambos picos son producto de la pérdida de agua higroscópica que se encuentra libre y no afectan a la estructura de la arcilla. Esta pérdida de agua se refleja también en las curvas termogravimétricas por la marcada pérdida de peso a bajas temperaturas hasta el primer salto importante (hasta P1). La aparición del siguiente pico (P2) en el termograma marca el salto desde los 50 a los 100°C. Este fenómeno se puede relacionar con

la presencia de caolinita, illita, hematita y clorita y la pérdida del agua ubicada entre las capas de dichos minerales, en los mesoporos y por el inicio de la pérdida del agua de hidratación.

En el siguiente salto, entre las temperaturas de 100 y 175°C, se observa un tercer pico exotérmico (P3) con pérdida de 0,26% de peso ya que los iones OH⁻ empiezan a ser liberados de la red cristalina en forma de vapor de agua, generando, en el caso de la caolinita, el rompimiento de la estructura cristalina para dar paso a la fase amorfa o metacaolín (Si₂Al₂O₅(OH)₄).

El cuarzo sufre transformación (de cuarzo alfa a cuarzo beta β) desde los 573 °C y la caolinita presente en la arcilla ha sido deshidroxilada hasta los 600°C. El fenómeno de pérdida de peso se prolonga hasta el siguiente salto que termina en los 850°C (P6) en donde habrán sufrido transformaciones todos los minerales de arcilla. En lo referente a la señal DTG, el pico máximo se detectó a los 104,81°C y la señal máxima a los 492,91°C. La línea negra discontinua muestra el comportamiento exotérmico y endotérmico de la muestra.

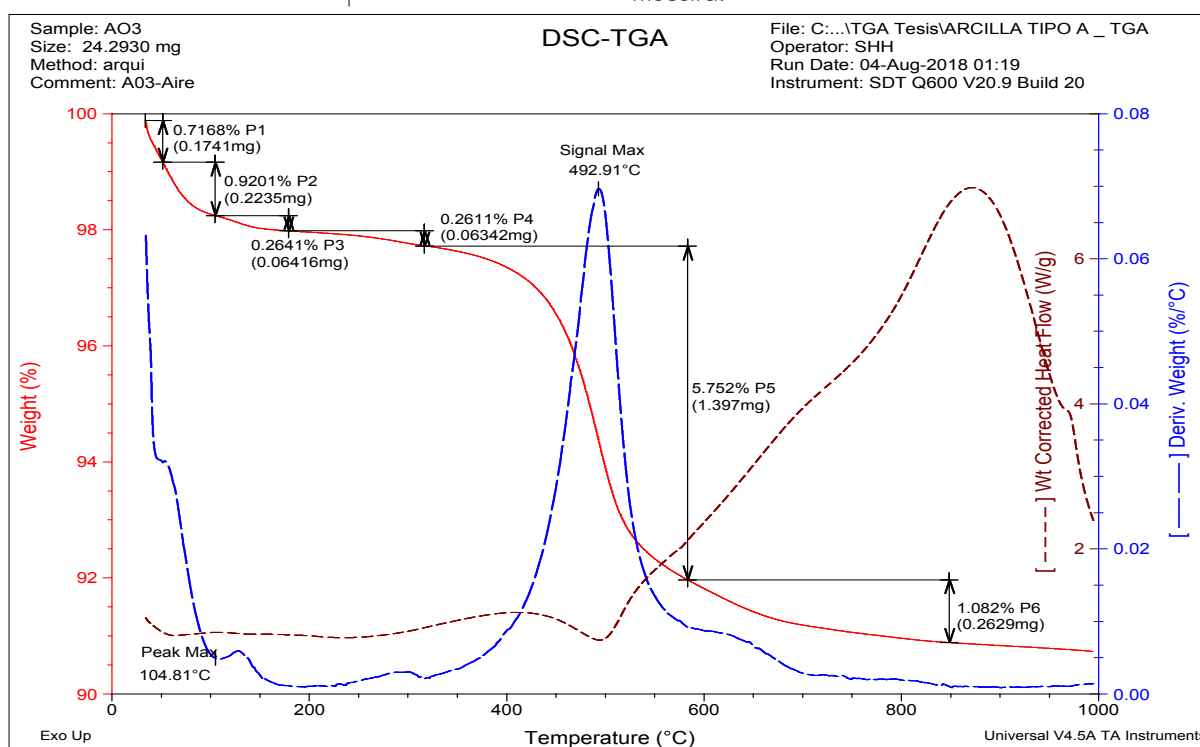


Fig. 6.6.1.4.1 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo A.

3.5.1.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo A

La descripción del análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX). El análisis FRX de la arcilla Tipo A evidenció la presencia de alto contenido de SiO_2 (60% aproximadamente) y Al_2O_3 (23% aproximadamente). También se encontró Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , y otros elementos que se detallan en la tabla de la figura 6.6.1.5.1 y de la figura 6.6.1.5.2. La relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es igual a 2,61 lo cual influye directamente en las características mecánicas de los geopolímeros fabricados a partir de esta materia prima. Los elementos que aparecen en porcentajes menores juegan un rol secundario pero también importante en la polimerización.

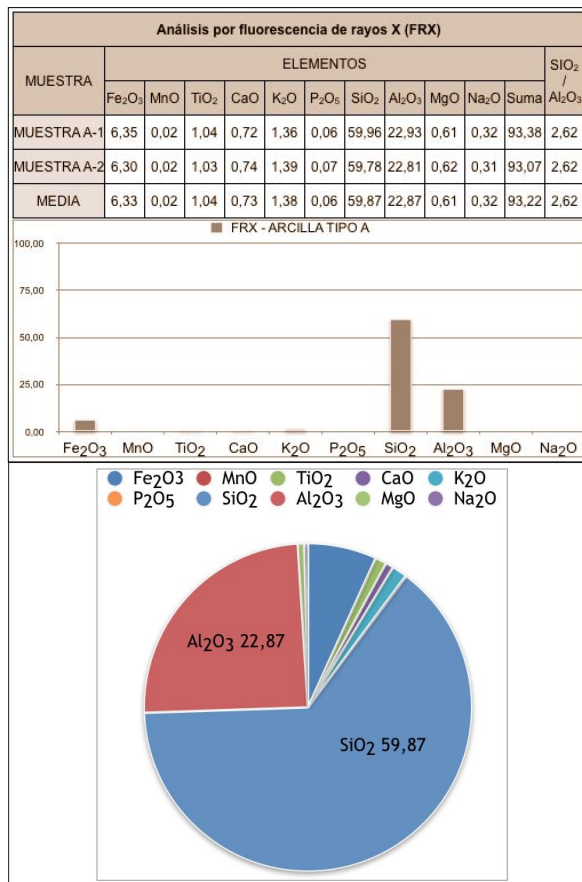


Fig. 6.6.1.5.1 Análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) y la cuantificación de los compuestos químicos.

3.5.1.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo A

La descripción del análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) se encuentra en el apartado 6.4 Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis ADL. La cantidad residual (0,851% <1%) muestra que se ajustaron los datos calculados a los datos de medición correctamente.

9,808 μm es el tamaño en el que el 50% de la muestra es más pequeño y el 50% es más grande. Este valor también se conoce como el diámetro mediano de masa (MMD) o la mediana de la distribución del volumen. 1,761 μm es el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 10% de la muestra. 52,52 μm es el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 90% de la muestra. 21,58 μm es la media ponderada por volumen o la media del momento de masa. 4,52 μm es la media ponderada en la superficie, también conocida como la media del diámetro del momento de la superficie o la media de Sauter.

5,17 es la medida del ancho de la distribución. Cuanto más estrecha es la distribución, menor es el intervalo. 0,0089%vol. es la concentración de volumen. 1,77 es la medida de la desviación absoluta de la mediana. 1,33 m^2/g es el área de superficie específica (SSA): el área total de las partículas dividida por el peso total.

El gráfico ADL correspondiente se observa en la Fig. 6.6.1.6.1 y los detalles se encuentran en el Anexo 6.6.1.6).

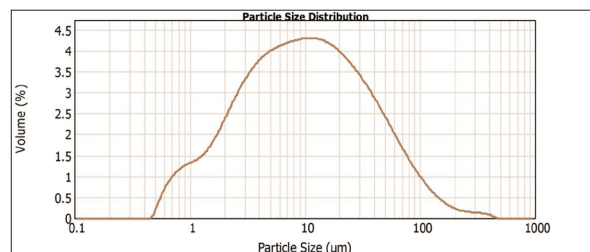


Fig. 6.6.1.6.1 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo A.

3.5.1.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo A

La descripción del análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Mediante las microscopías se observaron los diferentes hábitos de los principales cristales: cuarzo, caolinita, illita y clorita dispuestos en agregados de 5 a 15µm (Fig. 6.6.1.7.1, 6.6.1.7.2 y Fig. 6.6.1.7.6), partículas de 1 a 2µm (Fig. 6.6.1.7.6) y placas nanométricas (Fig. 6.6.1.7.6).

Se observa que las estructuras típicas (Capítulo 2: Las arcillas) han sido modificadas por micronización,

por tanto el ensamble de aglomerados es irregular, los agregados y partículas de arcilla están adheridos a partículas de cuarzo de mayor tamaño sin orden aparente. De todos modos es evidente la geometría prismática de las placas características de los filosilicatos de arcilla, redondeadas por la modificación mecánica pero con baja esfericidad y dispersas tal como se observa en las imágenes (Fig. 6.6.1.7.6).

Las microscopías coinciden con los análisis ADL en lo referente al tamaño de partículas presentes en la arcilla tipo A. El análisis cuantitativo recogido en los espectros 8 (Fig. 6.6.1.7.4) y 9 (Fig. 6.6.1.7.5) y en la tabla de la Fig. 6.6.1.7.3, evidencia la presencia dominante de sílice y aluminio y menores cantidades de K y Fe, corroborando la información de los análisis DRX y FRX (Detalles - Anexo 6.6.1.7).

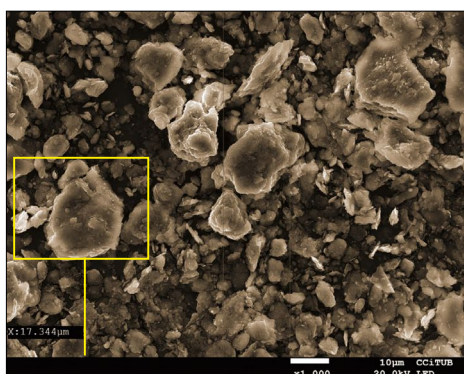


Fig. 6.6.1.7.1 Microscopía (SEM).

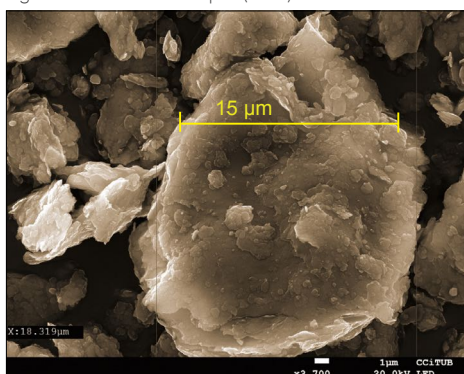


Fig. 6.6.1.7.2 Microscopía (SEM).

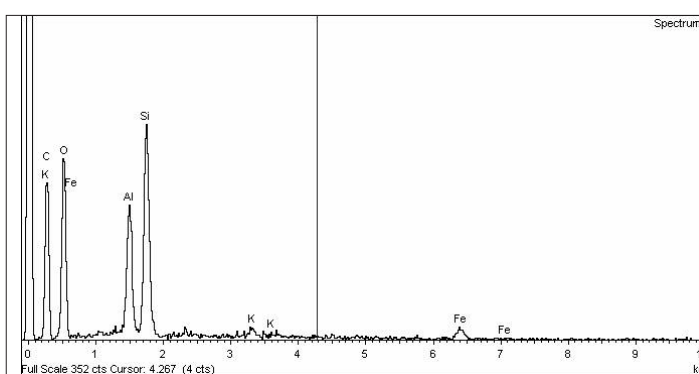


Fig. 6.6.1.7.4 Espectro 8 - Análisis SEM - Cuantitativo.

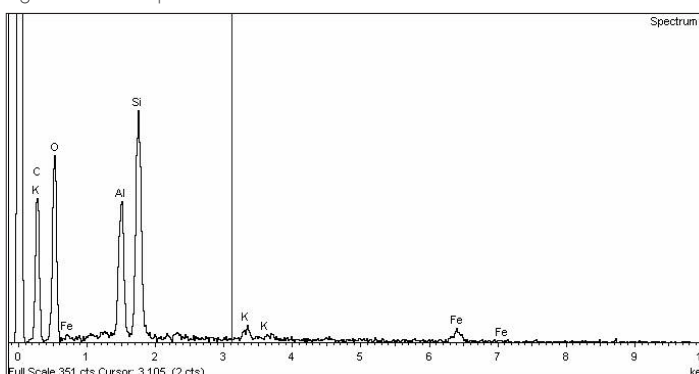


Fig. 6.6.1.7.5 Espectro 9 - Análisis SEM - Cuantitativo.

Análisis SEM - Cuantitativo - Arcilla Tipo A												
Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)												
Spectrum	In	C	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	O	Total
Spectrum 8	Yes	23.01		2.61	4.43		0.21			0.81	68.93	100.00
Spectrum 9	Yes	22.39		3.05	5.04		0.28			0.85	68.40	100.00

Fig. 6.6.1.7.3 Análisis SEM - Cuantitativo.

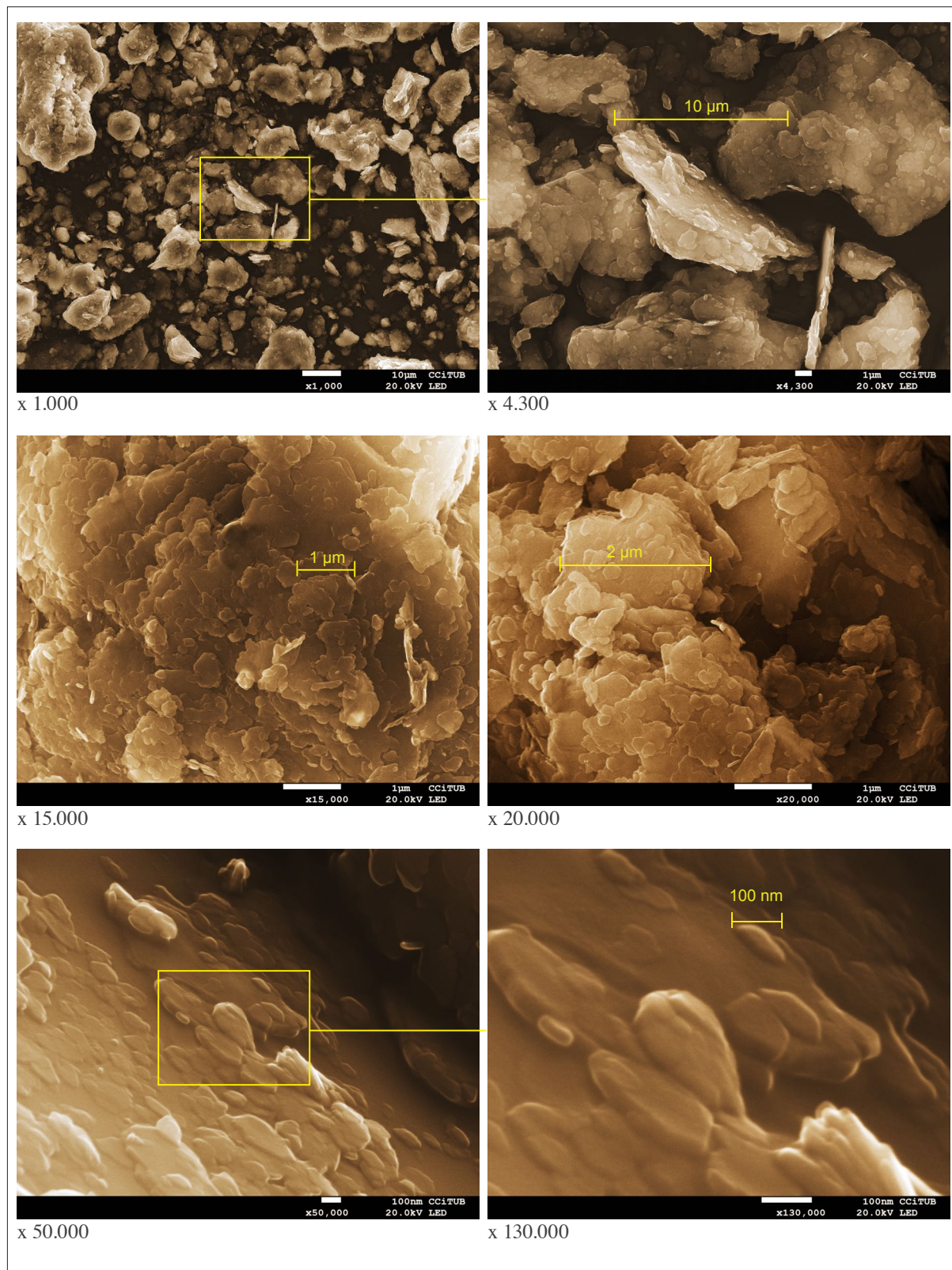


Fig. 6.6.1.7.6 Microscopías (SEM) Arcilla Tipo A.



Fig. 6.6.2.1.2 Arcilla Tipo B.

INFORMACIÓN DEL DISTRIBUIDOR - GRANULOMETRÍA	
GRANULOMETRÍA	ARCILLA TIPO B (%)
0,500	0,00
0,300	0,00
0,125	6,13
0,090	6,81
0,063	9,71
0,045	13,53
0,036	36,02
RESTO	27,01

Fig. 6.6.2.2.1 Granulometría suministrada por el distribuidor.

INFORMACIÓN DEL DISTRIBUIDOR - COMPOSICIÓN	
COMPOSICIÓN QUÍMICA	ARCILLA TIPO B
Na ₂ O	0,34
MgO	2,52
Al ₂ O ₃	18,13
SiO ₂	55,22
P ₂ O ₃	0,14
P ₂ O ₅	0,00
SO ₃	0,00
K ₂ O	3,59
CaO	4,62
TiO ₂	0,75
Cr ₂ O ₃	0,00
MnO	0,00
Fe ₂ O ₃	6,20

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA %	ARCILLA TIPO B
Clorita	2,00
Illita	2,40
Caolinita	9,00
Quarz	43,00
Feldespato K	4,00
Plagioclastio	5,00
Guethita	0,00
Hematita	3,00
Calcita	7,00
Dolomita	1,00
Montmorillonita	3,00

Fig. 6.6.2.2.2 Composición suministrada por el distribuidor.

3.5.2 Caracterización de arcilla Tipo B

3.5.2.1 Determinación del límite líquido y determinación del límite plástico

Para la determinación del límite líquido de la Arcilla Tipo A (Arcilla micronizada BEIG PEN/F - Fig. 6.6.2.1.2) se tomó como referencia la norma UNE 103103:1994 y para la determinación del límite plástico la norma UNE 103104:1993. La descripción del ensayo se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Determinación del límite líquido de un suelo por el método de la cuchara de Casagrande y Determinación del límite plástico de un suelo. En la tabla de la Figura (6.6.2.1.1) se exponen los resultados (Detalles - Anexo 6.6.2.1).

LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO (UNE 103-103-94 Y UNE 103-104-93)	
PLASTICIDAD	ARCILLA TIPO B
Límite líquido	40,8
Límite plástico	25,4
Índice de plasticidad	15,4

Fig. 6.6.2.1.1 Límite líquido y límite plástico.

3.5.2.2 Información suministrada por el distribuidor

La granulometría (Fig. 6.6.2.2.1) y la composición química y mineralógica (Fig. 6.6.2.2.2) de arcilla Tipo B fue suministrada por el proveedor: *argiles Colades S.A. del sector de La Bisbal d'Empordà (Girona-Barcelona)* (Detalles - Anexo 6.6.2.2).

3.5.2.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo B

La descripción del análisis por difracción de rayos X (DRX) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por difracción de rayos X (DRX). Se realizó la DRX de la arcilla tipo B (Arcilla micronizada BEIG PEN/F) tanto de la roca total como de la fracción arcilla. Las DRX de la fracción de arcilla fueron realizadas por el *Dr. Juan Diego Martín Martín del Dpt. Mineralogía, Petrología i Geología Aplicada de la Universitat*

de Barcelona (Anexo 6.6.3.3) y se dividen en DRX normal y DRX orientadas. Los resultados de las DRX de la fracción arcilla se muestran en: a) Interpretación e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación catalogando los minerales (Fig. 6.6.2.3.1 y Fig. 6.6.2.3.2); b) Diagrama DRX secado al aire (normal) (Anexo 6.6.2.3); c) Gráfico DRX de los tres diagramas superpuestos (Anexo 6.6.2.3).

Los análisis DRX de la fracción de arcilla (Fig. 6.6.2.3.1 y Fig. 6.6.2.3.2) evidencian la presencia de cuarzo, arcillas, feldespato alcalino potásico, hematita, etc. En lo referente al mineral de arcilla dominante se interpreta que es la illita seguida por la caolinita y la clorita.

Por otra parte se realizó una interpretación complementaria de los resultados de las DRX de la roca total mediante el software *X'Pert HighScore (PANalytical)* (Anexo 6.6.2.3) que evidencia la presencia dominante de cuarzo, caolinita, zeolitas y otros aluminosilicatos. En ambas interpretaciones se encuentran importantes cantidades de óxido de silicio en el cuarzo, caolinita, zeolita, aluminosilicatos, etc. También se detecta la presencia de calcio, sodio y agua. Esta información se complementa con los resultados de la fluorescencia de rayos X expuesto más adelante.

Interpretación e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación - Arcilla B		
Muestra A	Simbología	Ubicación
Cuarzo	(Q)	3,34 Å - 4,26 Å
Feldespato alcalino-potásico	(Fk)	4,25 Å
Plagioclasa: plg	(Plg)	4,19 Å
Calcita	(Ca)	3,04 Å
Goetita	Gt	4,18 Å
Hematita	(Hm)	2,69 Å
Illita	(I)	10 - 5 Å
Caolinita	(K)	7,15 - 3,58 Å
Clorita	(Chl)	14 - 7,10 - 4,72 - 3,54 Å

Illita > Caolinita >> Clorita

Total							Minerales de arcilla		
Q	Fk	Plg	Ca	Gt	Hm	Clay	I	K	Chl
***	**	*	*	*	*	**	***	**	*
(En la roca total de la tabla no se cuantifica los minerales de la arcillas por separado y se ha usado "Clay")							*** Dominante		
							** Abundante		
							* Presente		

Fig. 6.6.2.3.2 Cuadro resumen de interpretación DRX.

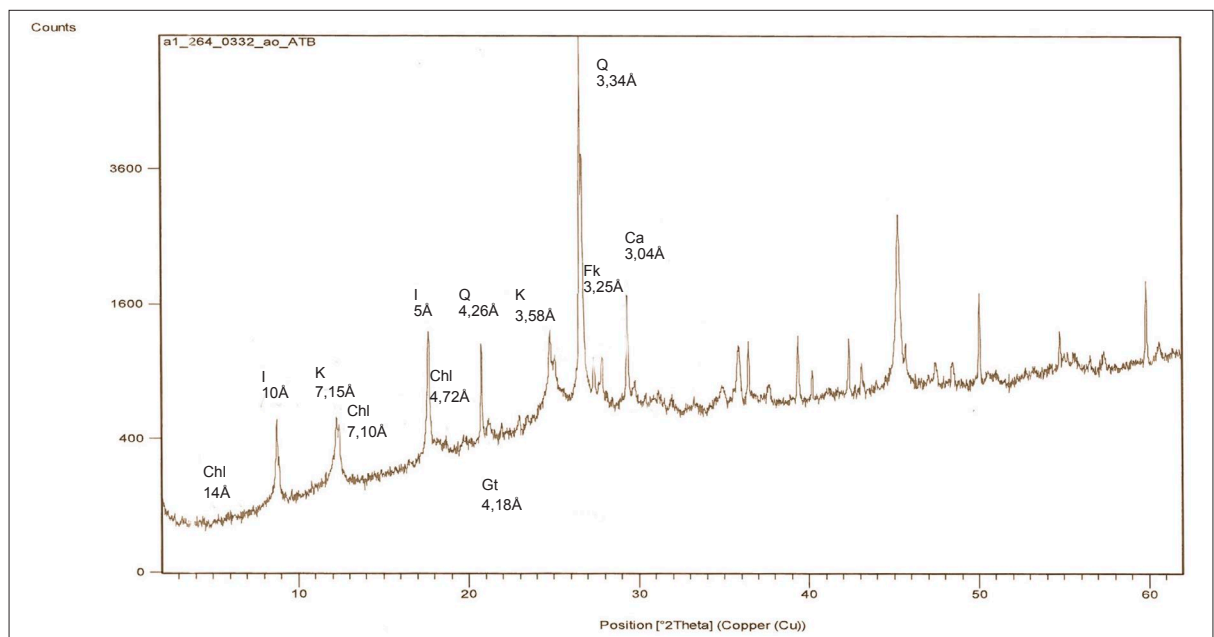


Fig. 6.6.2.3.1 Interpretación de análisis DRX e identificación de los picos de las muestras y los minerales (arcillas) (Dr. Juan Diego Martín).

3.5.2.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo B

El resultado obtenido mediante ATG en aire, la derivada de la pérdida de masa respecto a la temperatura (DTG), y el flujo de calor de peso corregido se muestra en la gráfica de la Fig.6.6.2.4.1 La señal DTG se emplea para establecer los rangos de temperatura en los que tienen lugar las transformaciones.

En la gráfica se observa un primer salto a los 50°C y un segundo salto entre los 50 y los 120°C. Ambos picos son producto de la pérdida de agua higroscópica que se encuentra libre y no afectan a la estructura de la arcilla. Esta pérdida de agua se refleja también en las curvas termogravimétricas por la marcada pérdida de peso a bajas temperaturas hasta el primer salto (P1) y el segundo salto (P2). El siguiente pico (P3) marca el salto desde los 120 a los 250°C y se puede relacionar con la presencia principalmente de illita y la pérdida del agua ubicada entre las capas de caolinita, clorita, en los mesoporos del material.

El siguiente salto, entre las temperaturas de 250 y 340°C marcado en el próximo pico (P4) se debe a que los iones OH⁻ empiezan a ser liberados de la red cristalina en forma de vapor de agua, deshidroxilando la illita y generando en el caso de la caolinita, el rompimiento de la estructura cristalina para dar paso a la fase amorfa o metacaolín (Si₂Al₂O₅(OH)₄), este fenómeno se prolonga hasta el siguiente salto que termina en los 490°C (P5). El cuarzo sufre transformación desde los 573°C (de cuarzo alfa a a cuarzo beta β). La caolinita ha sido deshidroxilada convirtiéndose en metacaolín antes de llegar al pico P6. El pico máximo obtenido mediante el software de análisis fue a los 235,19°C y la señal máxima a los 888,65°C.

Se concluye de esta etapa de caracterización que las arcillas Tipo B presentan un comportamiento típico de arcillas con importante cantidad de illita y la presencia de caolinita corroborando la información obtenida del análisis DRX y FRX.

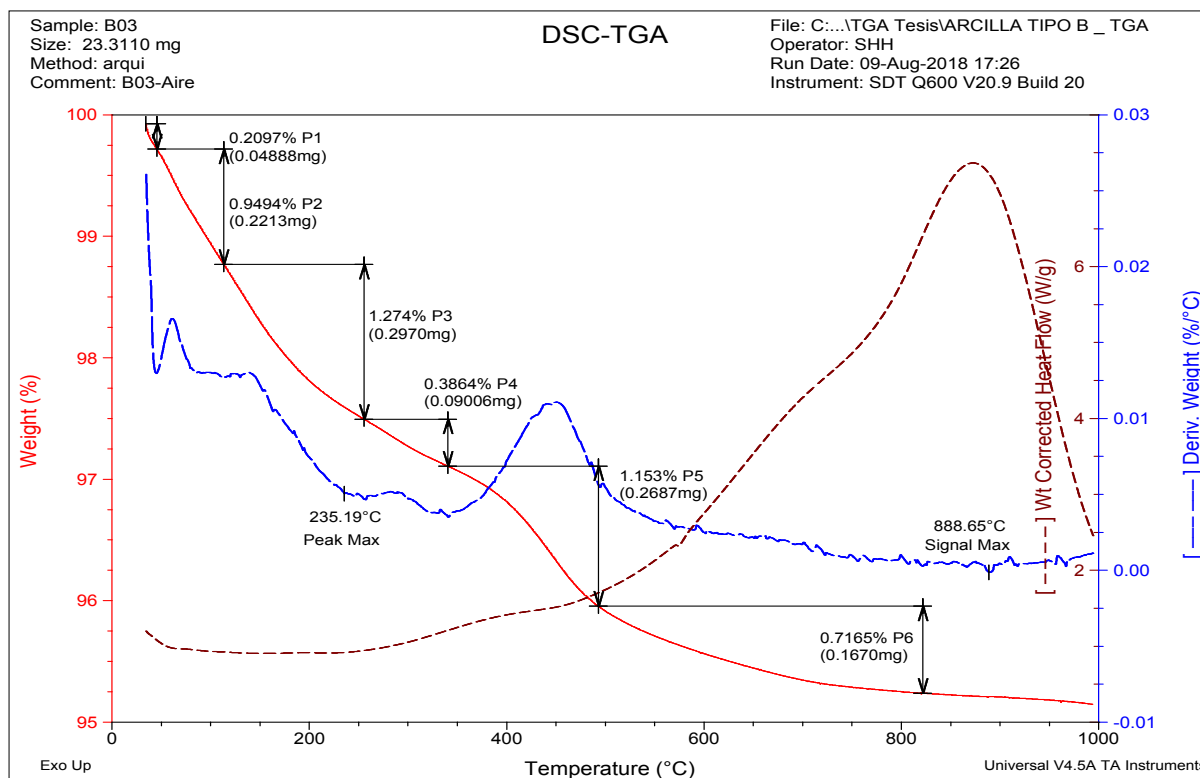


Fig. 6.6.2.4.1 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo B.

3.5.2.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo B

La descripción del análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX). El análisis FRX de la arcilla Tipo B evidenció la presencia de alto contenido de SiO_2 (58% aproximadamente) y Al_2O_3 (17% aproximadamente).

También se encontró Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , y otros elementos que se detallan en la tabla de la figura 6.6.2.5.1 y de la figura 6.6.2.5.2. La relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es igual a 3,475 lo cual influye directamente en las características mecánicas de los geopolímeros fabricados a partir de esta materia prima.

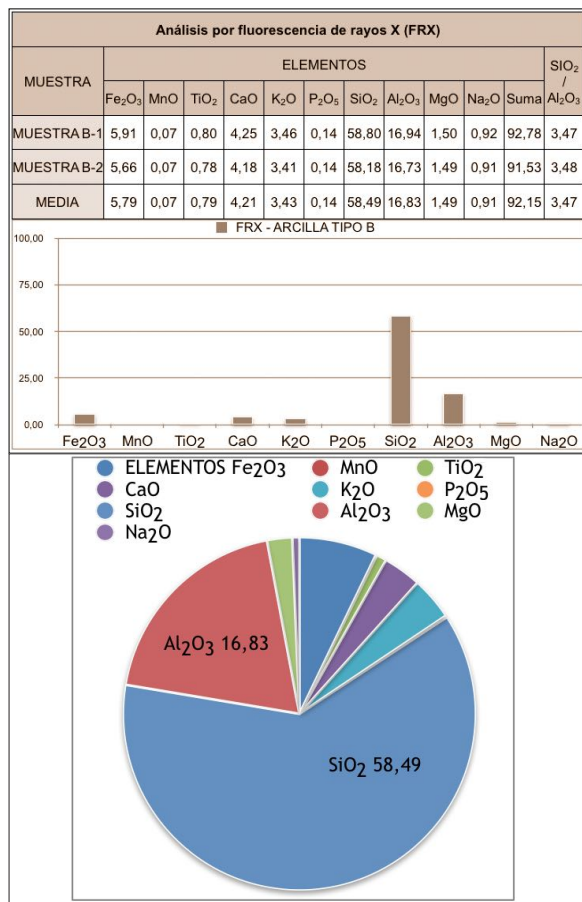


Fig. 6.6.2.5.1 Análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) y la cuantificación de los compuestos químicos.

3.5.2.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo B

La descripción del análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis ADL. La cantidad residual (0,73% <1%) muestra que se ajustaron los datos calculados a los datos de medición correctamente.

11,312 μm es el tamaño en el que el 50% de la muestra es más pequeño y el 50% es más grande. Este valor también se conoce como el diámetro mediano de masa (MMD) o la mediana de la distribución del volumen. 2,35 μm es el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 10% de la muestra. 54,84 μm es el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 90% de la muestra. 21,29 μm es la media ponderada por volumen o la media del momento de masa. 5,51 μm es la media ponderada en la superficie, también conocida como la media del diámetro del momento de la superficie o la media de Sauter.

4,64 es la medida del ancho de la distribución. Cuanto más estrecha es la distribución, menor es el intervalo. 0,01%vol. es la concentración de volumen. 1,47 es la medida de la desviación absoluta de la mediana. 1,09 m^2/g es el área de superficie específica (SSA): el área total de las partículas dividida por el peso total.

El gráfico ADL correspondiente se observa en la Fig. 6.6.2.6.1 y los detalles se encuentran en el anexo 6.6.2.6).

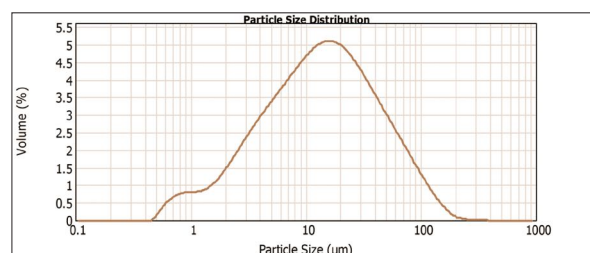


Fig. 6.6.2.6.1 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo B.

3.5.2.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo B

La descripción del análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) se encuentra en el apartado 6.4: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Mediante las microscopías se observaron los diferentes hábitos de los principales cristales: cuarzo, caolinita y clorita dispuestos en agregados de 5 a 15µm (Fig. 6.6.2.7.1 y Fig. 6.6.2.7.6); partículas de 1 a 2µm (Fig. 6.6.2.7.2 y Fig. 6.6.2.7.6); y placas nanométricas (Fig. 6.6.2.7.6).

También se observa estructuras típicas (Capítulo 2: Las arcillas) de las caolinitas en aglomerados

bien definidos. Los agregados y partículas de las arcillas están adheridos a partículas de cuarzo. Se observa la geometría prismática de las placas características de caolinitas y cloritas redondeadas por la modificación mecánica, con baja esfericidad, agrupadas y dispersas aleatoriamente; además es posible que por efecto de la micronización no se observan a simple vista cristales de illitas en estructuras definidas (Fig. 6.6.2.7.6).

Las microscopías ratifican los análisis ADL en cuanto al tamaño de partículas de la arcilla tipo B. El análisis cuantitativo recogido en los espectros 12 (Fig. 6.6.2.7.4) y 13 (Fig. 6.6.2.7.5); y en la tabla de la Fig. 6.6.2.7.3; muestra la presencia dominante de sílice y aluminio y menores cantidades de K lo cual corrobora la información de los análisis DRX y FRX (Detalles - Anexo 6.6.2.7).

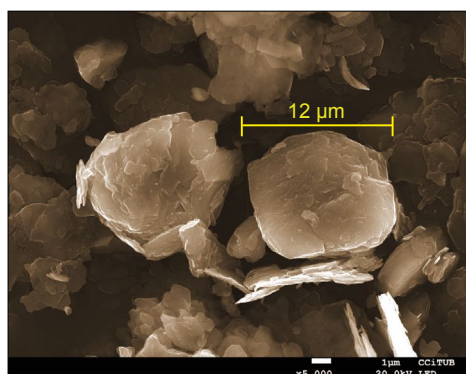


Fig. 6.6.2.7.1 Microscopía (SEM).

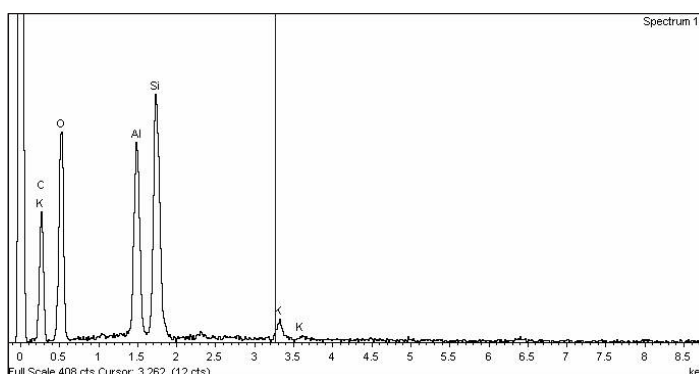


Fig. 6.6.2.7.4 Espectro 12 - Análisis SEM - Cuantitativo.

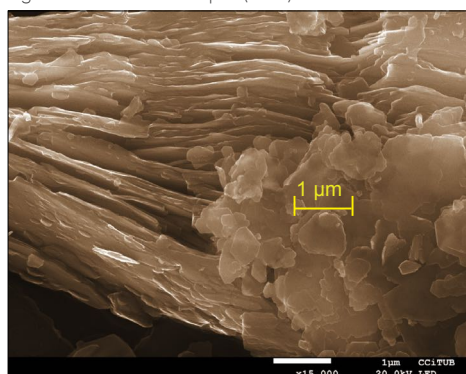


Fig. 6.6.2.7.2 Microscopía (SEM).

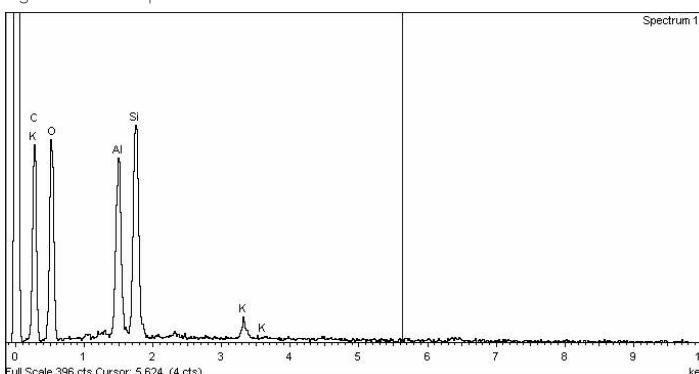


Fig. 6.6.2.7.5 Espectro 13 - Análisis SEM - Cuantitativo.

Análisis SEM - Cuantitativo - Arcilla Tipo B												
Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)												
Spectrum	In	C	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	O	Total
Spectrum 12	Yes	21.52		4.40	5.71		0.52				67.85	100.00
Spectrum 13	Yes	23.36		3.04	3.88		0.33				69.40	100.00

Fig. 6.6.2.7.3 Análisis SEM - Cuantitativo.

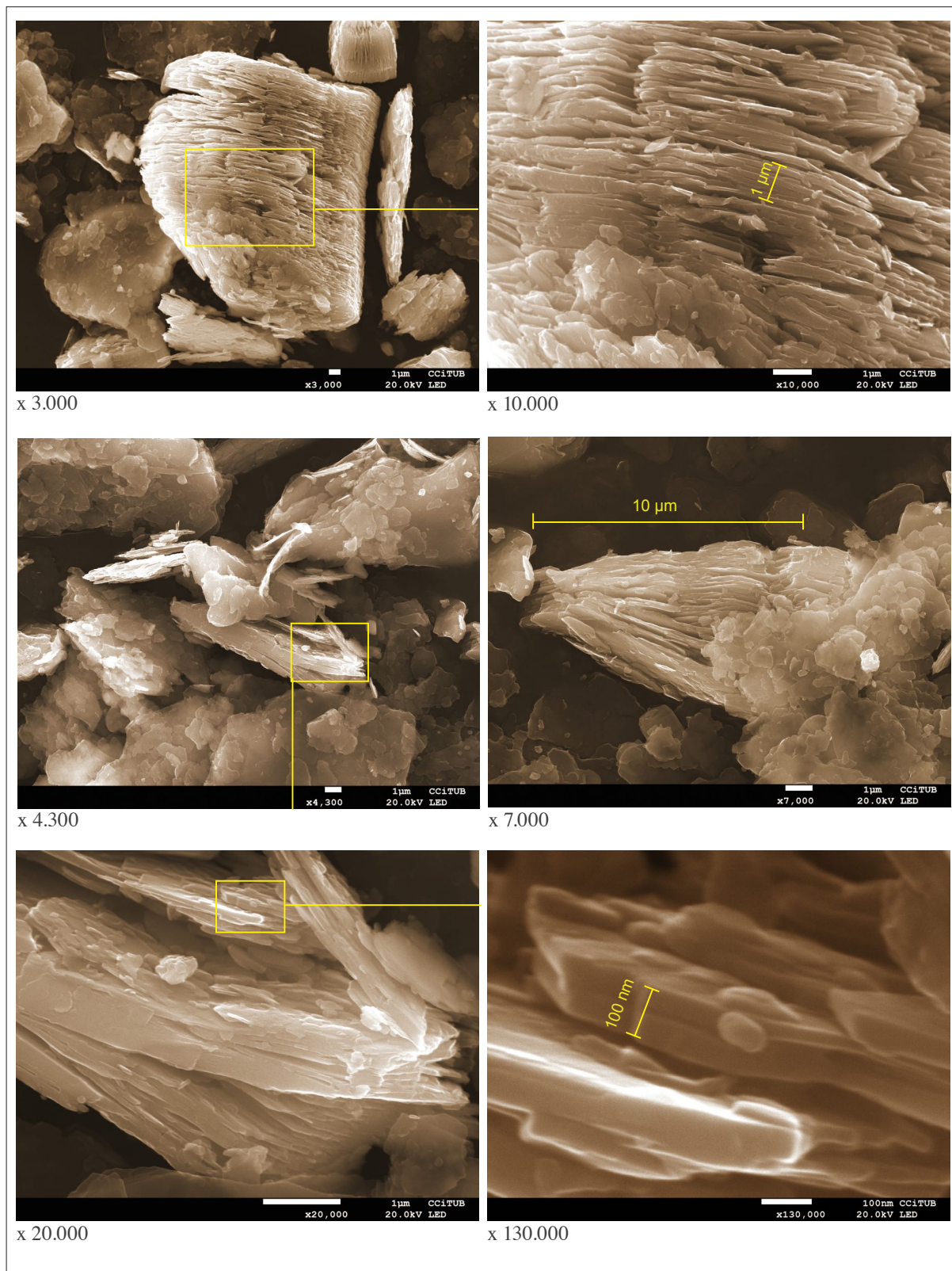


Fig. 6.6.2.7.6 Microscopías (SEM) Arcilla Tipo B.



Fig. 6.6.3.1.2 Arcilla Tipo C.

INFORMACIÓN DEL DISTRIBUIDOR - GRANULOMETRÍA	
GRANULOMETRÍA	ARCILLA TIPO C (%)
0,500	32,95
0,300	25,28
0,125	12,35
0,090	8,28
0,063	7,35
0,045	7,15
0,036	5,29
RESTO	1,25

Fig. 6.6.3.2.1 Granulometría suministrada por el distribuidor.

INFORMACIÓN DEL DISTRIBUIDOR - COMPOSICIÓN	
COMPOSICIÓN QUÍMICA	ARCILLA TIPO C
Na ₂ O	0,34
MgO	2,52
Al ₂ O ₃	18,13
SiO ₂	55,22
P ₂ O ₃	0,14
P ₂ O ₅	0,00
SO ₃	0,00
K ₂ O	3,59
CaO	4,62
TiO ₂	0,75
Cr ₂ O ₃	0,00
MnO	0,00
Fe ₂ O ₃	6,20

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA %	ARCILLA TIPO C
Clorita	2,00
Illita	2,00
Caolinita	9,00
Quarz	43,00
Feldespató K	4,00
Plagioclastio	5,00
Guethita	0,00
Hematita	3,00
Calcita	7,00
Dolomita	1,00
Montmorillonita	3,00

Fig. 6.6.3.2.2 Composición suministrada por el distribuidor.

3.5.3 Caracterización de arcilla Tipo C

3.5.3.1 Determinación del límite líquido y determinación del límite plástico

Para la determinación del límite líquido de la Arcilla Tipo C (Arcilla micronizada ROJA - Fig. 6.6.3.1.2) se tomó como referencia la norma UNE 103103:1994 y para la determinación del límite plástico la norma UNE 103104:1993. La descripción del ensayo se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande y Determinación del límite plástico de un suelo. En la tabla de la Figura (6.6.3.1.1) se exponen los resultados (Detalles - Anexo 6.6.3.1).

LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO (UNE 103-103-94 Y UNE 103-104-93)	
PLASTICIDAD	ARCILLA TIPO C
Límite líquido	36,0
Límite plástico	22,4
Índice de plasticidad	13,6

Fig. 6.6.3.1.1 Límite líquido y límite plástico.

3.5.3.2 Información suministrada por el distribuidor

La granulometría (Fig. 6.6.3.2.1) y la composición química y mineralógica (Fig. 6.6.3.2.2) de arcilla Tipo C fue suministrada por el proveedor: *argiles Colades S.A. del sector de La Bisbal d'Empordá (Girona-Barcelona)* (Detalles - Anexo 6.6.3.2).

3.5.3.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo C

La descripción del análisis por difracción de rayos X (DRX) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por difracción de rayos X (DRX). Se realizó la DRX de la arcilla tipo C (Arcilla micronizada ROJA) tanto de la roca total como de la fracción arcilla. Las DRX de la fracción de arcilla fueron realizadas por el *Dr. Juan Diego Martín Martín del Dpt. Mineralogía, Petrología i Geología Aplicada de la Universitat de Barcelona* (Anexo 6.6.3.3) y se dividen en DRX normal y DRX orientadas. Los resultados de las DRX de la fracción arcilla se muestran en:

a) Interpretación e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación catalogando los minerales (Fig. 6.6.3.3.1 y Fig. 6.6.3.3.2); b) Diagrama DRX secado al aire (normal) (Detalles-Anexo 6.6.3.3); c) Gráfico DRX de los tres diagramas superpuestos (Anexo 6.6.3.3).

Los análisis DRX de la fracción de arcilla (Fig. 6.6.3.3.1 y Fig. 6.6.3.3.2) evidencian la presencia de cuarzo, arcillas, feldespato alcalino potásico, calcita, etc. En lo referente al mineral de arcilla dominante se interpreta que es la caolinita seguida por la illita y la clorita.

Por otra parte se realizó una interpretación complementaria de los resultados de las DRX de la roca total mediante el software *X'Pert HighScore (PANalytical)* (Anexo 6.6.1.3). Este análisis evidencia la presencia dominante de cuarzo, haloisita hidratada, caolinita, etc. En ambas interpretaciones se encuentran importantes cantidades de óxido de silicio en el cuarzo, caolinita, haloisita, vermiculita; óxido de aluminio en la caolinita y haloisita. También se detecta la presencia de calcio, sodio y agua.

Esta información se complementa con los resultados de la fluorescencia de rayos X expuesto más adelante.

Interpretación e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación - Arcilla C		
Muestra A	Simbología	Ubicación
Cuarzo	(Q)	3,34 Å - 4,26 Å
Feldespato alcalino-potásico	(Fk)	3,25 Å
Plagioclasa: plg	(Plg)	3,19 Å
Calcita	(Ca)	3,04 Å
Hematita	(Hm)	2,69 Å
Illita	(I)	10 - 5 Å
Caolinita	(K)	7,15 - 3,58 Å
Clorita	(Chl)	14 - 7,10 - 4,72 - 3,54 Å

Caolinita > Illita >> Clorita

Total						Minerales de arcilla		
Q	Fk	Plg	Ca	Hm	Clay	K	I	Chl
***	*	*	*	*	**	**	**	**
(En la roca total de la tabla no se cuantifica los minerales de la arcillas por separado y se ha usado "Clay")						*** Dominante		
						**Abundante		
						*Presente		

Fig. 6.6.3.3.2 Cuadro resumen de interpretación DRX.

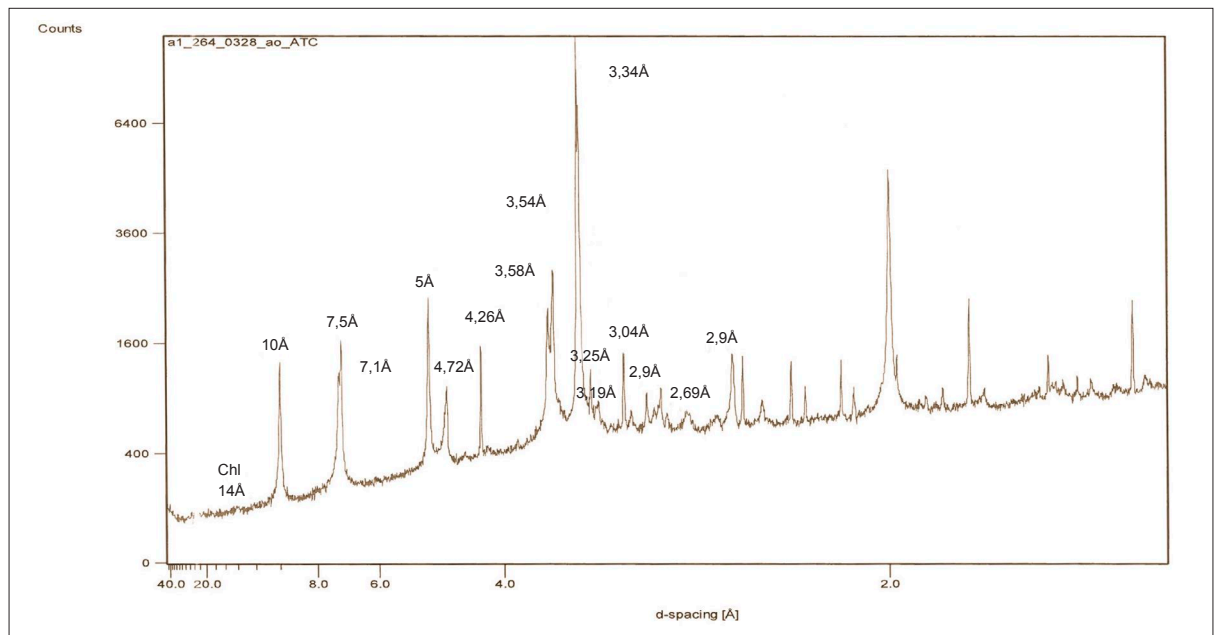


Fig. 6.6.3.3.1 Interpretación de análisis DRX e identificación de los picos de las muestras y los minerales (arcillas) (Dr. Juan Diego Martín).

3.5.3.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo C

El procedimiento de análisis termogravimétrico (ATG) se explica en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos: Análisis termogravimétrico (ATG). El peso de la muestra analizada fue de 26.33mg. El resultado obtenido mediante ATG en aire, la derivada de la pérdida de masa respecto a la temperatura (DTG), y el flujo de calor de peso corregido se muestra en la gráfica de la Fig.6.6.3.4.1 La señal DTG se emplea para establecer los rangos de temperatura en los que tienen lugar las transformaciones.

En la gráfica ATG se observa un primer pico a los 50°C (P1) y un segundo pico a los 110°C (P2). Ambos picos son producto de la pérdida de agua higroscópica que se encuentra libre y no afectan a la estructura de la arcilla. Esta pérdida de agua se refleja también en las curvas termogravimétricas por la marcada pérdida de peso a bajas temperaturas hasta el primer salto importante (P1). La aparición del siguiente pico (P2) marca el inicio del siguiente salto hacia los 200°C. Este fenómeno se puede

relacionar con la presencia de caolinita, illita, clorita y la pérdida del agua ubicada entre las capas de dichos minerales y en los mesoporos y el inicio de la pérdida del agua de hidratación.

En el siguiente salto, entre las temperaturas de 200 y 250°C, se observan varios picos y pérdida de peso hasta P3 y P4 a los 550°C. Esto se debe a que los iones OH⁻ empiezan a ser liberados de la red cristalina en forma de vapor de agua, generando, en el caso de la caolinita, el rompimiento de la estructura cristalina para dar paso a la fase amorfa o metacaolín (Si₂Al₂O₅(OH)₄), este fenómeno se prolonga hasta los dos siguientes saltos: 630°C (P5) y 740°C (P6) en donde el cuarzo sufre transformación desde los 573°C y la caolinita presente en la arcilla ha sido deshidroxilada hasta los 600°C. El pico máximo obtenido mediante el software de análisis fue a los 106,97°C y la señal máxima a los 984,54°C. Se concluye que las arcillas Tipo C presentan un comportamiento típico de arcillas con presencia de caolinita e illita, corroborando la información de los análisis DRX y FRX.

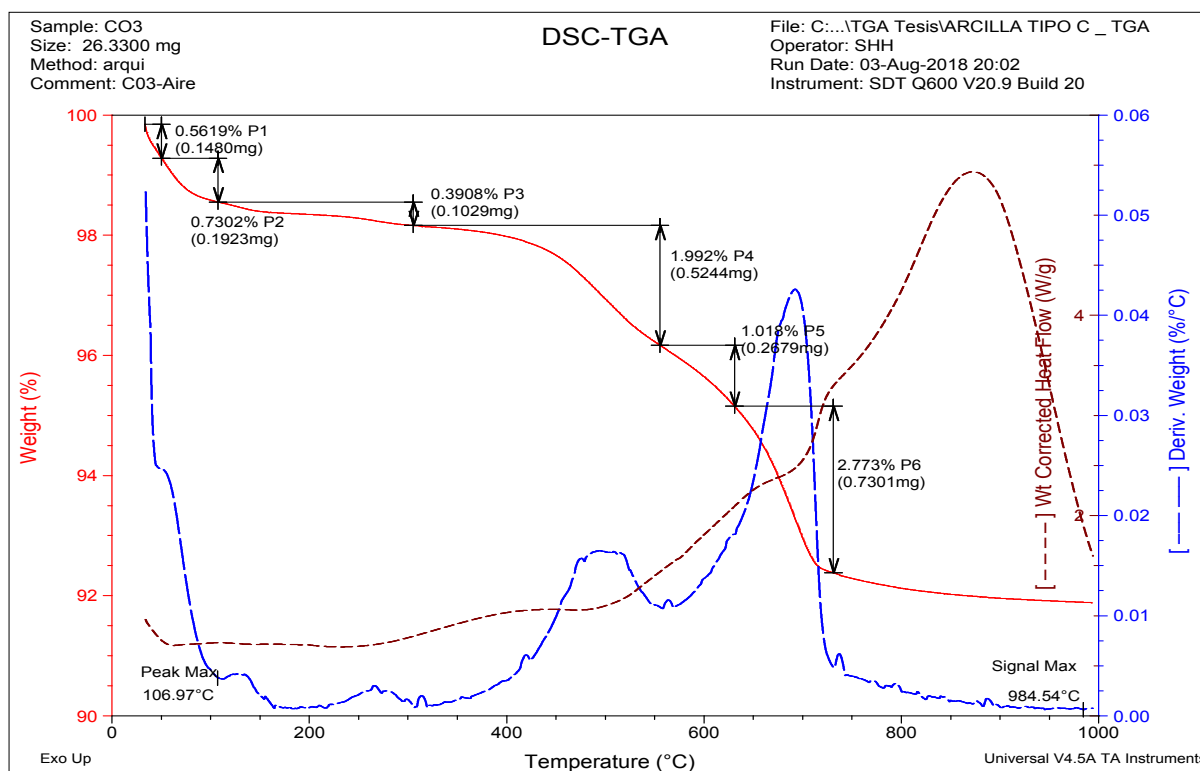


Fig. 6.6.3.4.1 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo C.

3.5.3.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo C

La descripción del análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX). Los análisis FRX de la arcilla Tipo C evidenció la presencia de alto contenido de SiO₂ (58% aproximadamente) y Al₂O₃ (18% aproximadamente).

También se encontró Fe₂O₃, TiO₂, CaO, y otros elementos que se detallan en la tabla de la figura 6.6.3.5.1 y de la figura 6.6.3.5.2. La relación SiO₂/Al₂O₃ es igual a 3,187 lo cual influye directamente en las características mecánicas de los geopolímeros fabricados a partir de esta materia prima.

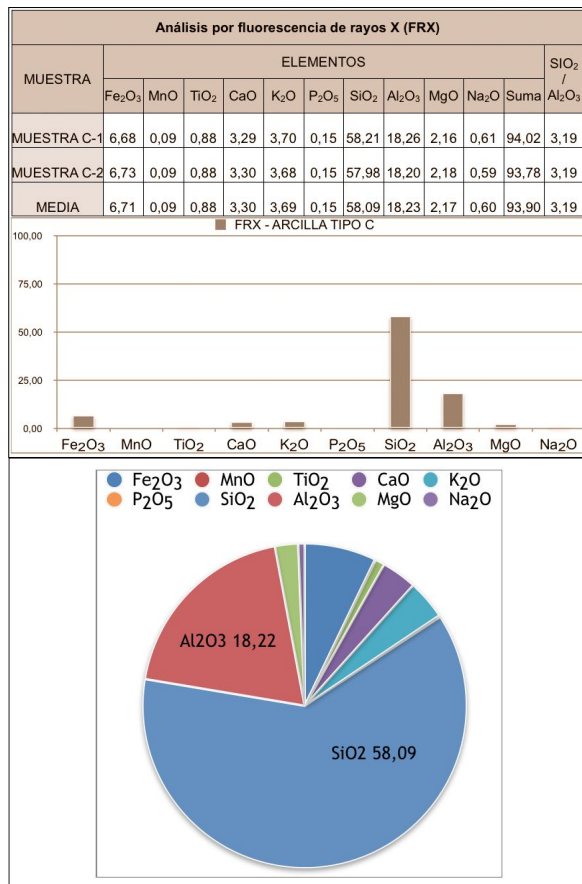


Fig. 6.6.3.5.1 Análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) y la cuantificación de los compuestos químicos.

3.5.3.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo C

La descripción del análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis ADL. La cantidad residual (0,7% <1%) muestra que se ajustaron los datos calculados a los datos de medición correctamente.

10,62µm es el tamaño en el que el 50% de la muestra es más pequeño y el 50% es más grande. Este valor también se conoce como el diámetro mediano de masa (MMD) o la mediana de la distribución del volumen. 2,49µm es el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 10% de la muestra. 52,01µm es el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 90% de la muestra. 21,61µm es la media ponderada por volumen o la media del momento de masa. 5,51µm es la media ponderada en la superficie, también conocida como la media del diámetro del momento de la superficie o la media de Sauter.

4,66 es la medida del ancho de la distribución. Cuanto más estrecha es la distribución, menor es el intervalo. 0,01%vol. es la concentración de volumen. 1,54 es la medida de la desviación absoluta de la mediana. 1,09m²/g es el área de superficie específica (SSA): el área total de las partículas dividida por el peso total.

El gráfico ADL correspondiente se observa en la Fig. 6.6.3.6.1 y los detalles se encuentran en el anexo 6.6.3.6).

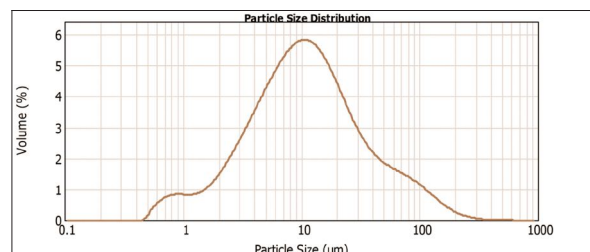


Fig. 6.6.3.6.1 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo C.

3.5.3.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo C

La descripción del análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Mediante las microscopías se observaron los diferentes hábitos de los principales cristales: cuarzo (Fig. 6.6.3.7.2), caolinita, illita y clorita dispuestos en agregados de 5 a 15µm (Fig. 6.6.3.7.1 y Fig. 6.6.3.7.6), partículas de 1 a 2µm (Fig. 6.6.3.7.6) y placas nanométricas (Fig. 6.6.3.7.6).

También se observa que las estructuras típicas (Capítulo 2: Las arcillas) han sido modificadas

por micronización, por tanto el ensamble de aglomerados es irregular. Los agregados y partículas de arcilla están aleatoriamente adheridos a partículas de cuarzo de mayor volumen. Pese a ello se observa la geometría prismática de las placas características de la caolinita, alteradas y dispersas por la acción mecánica, tal como se observa en las imágenes (Fig. 6.6.3.7.6).

Las microscopías ratifican los análisis ADL en lo referente al tamaño de partículas de la arcilla tipo C. El análisis cuantitativo recogido en los espectros 14 (Fig. 6.6.3.7.4) y 15 (Fig. 6.6.3.7.5) y en la tabla de la Fig. 6.6.3.7.3 evidencia la presencia dominante de sílice y aluminio y menores cantidades de Mg, Ca, Fe y K, lo cual corrobora la información de los análisis DRX y FRX (Detalles - Anexo 6.6.3.7).

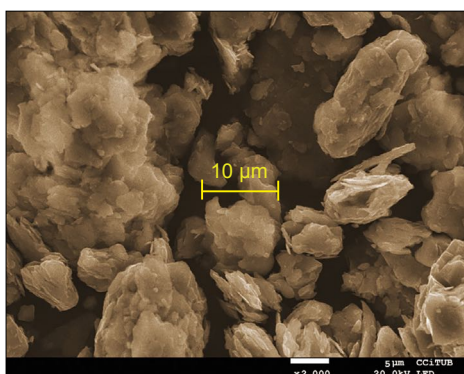


Fig. 6.6.3.7.1 Microscopía (SEM).

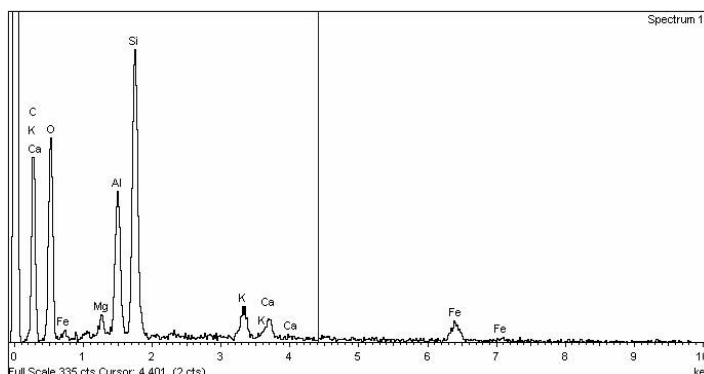


Fig. 6.6.3.7.4 Espectro 14 - Análisis SEM - Cuantitativo.

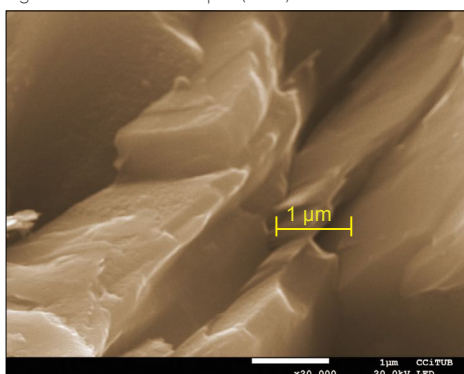


Fig. 6.6.3.7.2 Microscopía (SEM).

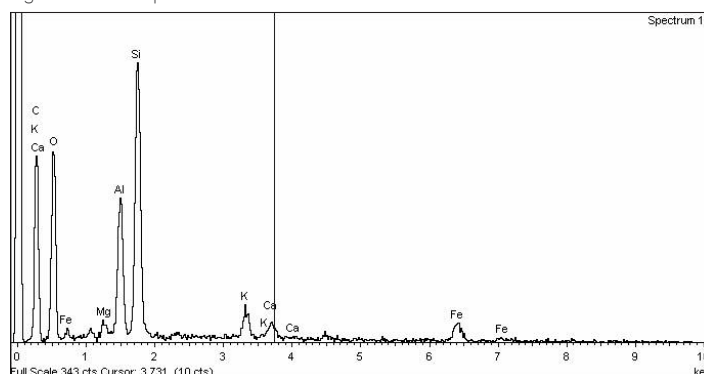


Fig. 6.6.3.7.5 Espectro 15 - Análisis SEM - Cuantitativo.

Análisis SEM - Cuantitativo - Arcilla Tipo C												
Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)												
Spectrum	In	C	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	O	Total
Spectrum 14	Yes	22.26	0.38	2.42	4.88		0.66	0.43		1.09	67.88	100.00
Spectrum 15	Yes	22.48	0.32	2.34	4.64		0.62	0.37		1.18	68.07	100.00

Fig. 6.6.3.7.3 Análisis SEM - Cuantitativo.

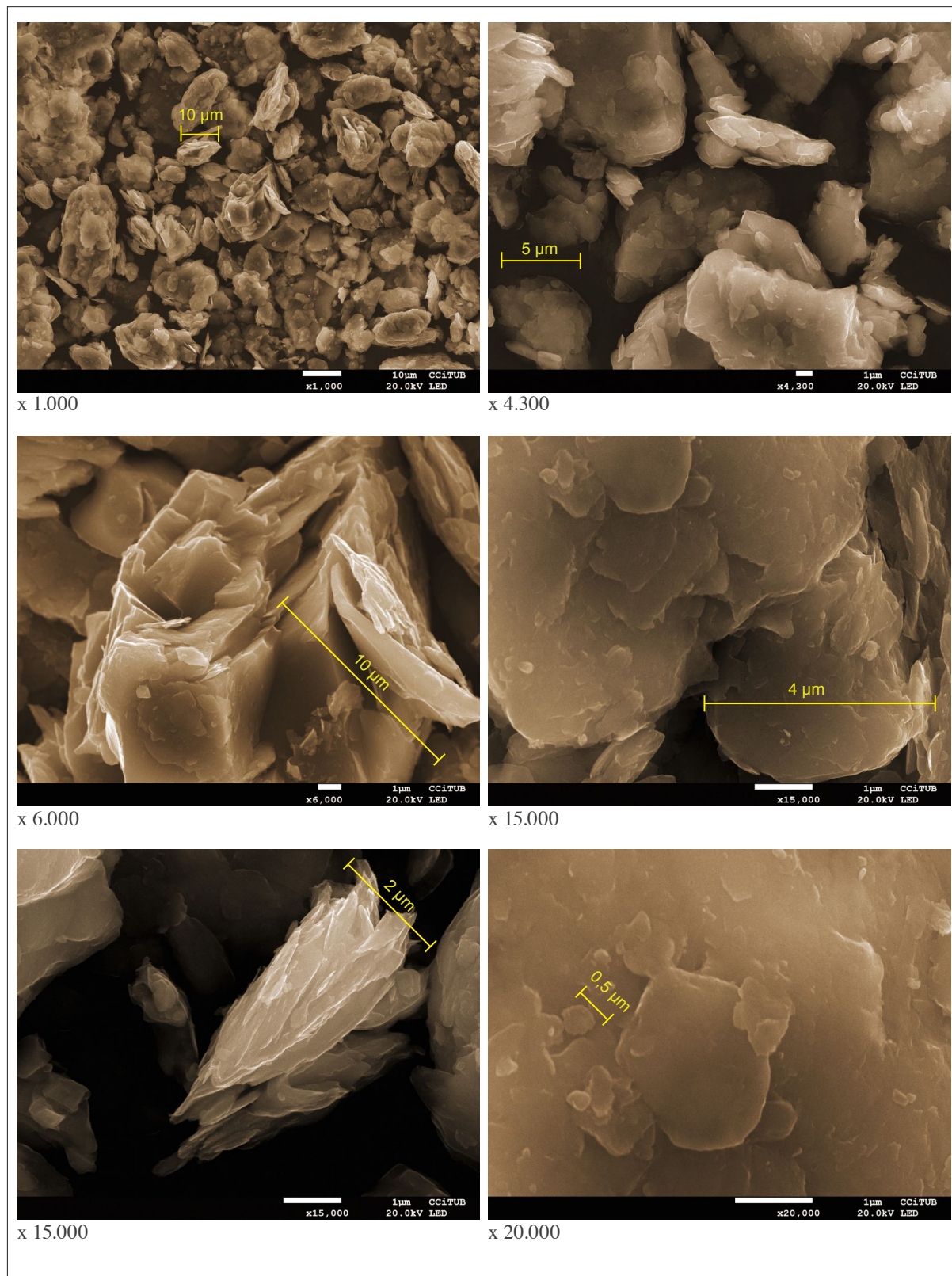


Fig. 6.6.3.7.6 Microscopías (SEM) Arcilla Tipo C.

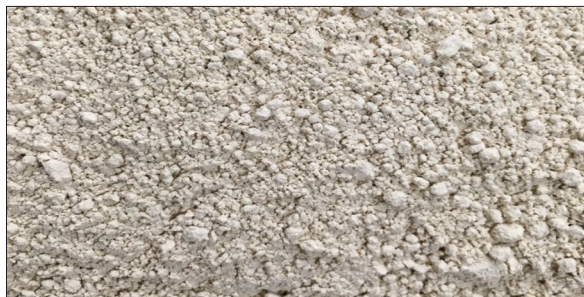


Fig. 6.6.4.1.2 Arcilla Tipo D.

INFORMACIÓN DEL DISTRIBUIDOR - GRANULOMETRÍA

GRANULOMETRÍA	ARCILLA TIPO D
INFERIOR A 10 MICRAS	88,5 %
INFERIOR A 2 MICRAS	45,8 %

Fig. 6.6.4.2.1 Granulometría suministrada por el distribuidor.

INFORMACIÓN DEL DISTRIBUIDOR - COMPOSICIÓN

COMPOSICIÓN QUÍMICA	ARCILLA TIPO D
Na ₂ O	0,00
MgO	0,00
Al ₂ O ₃	30,90
SiO ₂	52,30
P ₂ O ₃	0,00
P ₂ O ₅	0,00
SO ₃	0,00
K ₂ O	3,39
CaO	0,10
TiO ₂	0,00
Cr ₂ O ₃	0,00
MnO	0,00
Fe ₂ O ₃	1,54

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA %	ARCILLA TIPO D
Clorita	
Illita	
Caolinita	100,00
Quarz	
Feldespatio K	
Plagioclastio	
Guethita	
Hematita	
Calcita	
Dolomita	
Montmorillonita	

Fig. 6.6.4.2.2 Composición suministrada por el distribuidor.

3.5.4 Caracterización de arcilla Tipo D

6.5.4.1 Determinación del límite líquido y determinación del límite plástico

Para la determinación del límite líquido de la Arcilla Tipo D (Caolín MD-25 - Fig. 6.6.4.1.2) se tomó como referencia la norma UNE 103103:1994 y para la determinación del límite plástico la norma UNE 103104:1993. La descripción del ensayo se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande y Determinación del límite plástico de un suelo. En la tabla de la Figura (6.6.4.1.1) se exponen los resultados (Detalles - Anexo 6.6.4.1).

LÍMITES LÍQUIDO Y PLÁSTICO (UNE 103-103-94 Y UNE 103-104-93)	
PLASTICIDAD	ARCILLA TIPO D
Límite líquido	47,9
Límite plástico	35,3
Índice de plasticidad	12,6

Fig. 6.6.4.1.1 Límite líquido y límite plástico.

3.5.4.2 Información suministrada por el distribuidor

La granulometría (Fig. 6.6.4.2.1) y la composición química y mineralógica (Fig. 6.6.4.2.2) de arcilla Tipo C fue suministrada por el proveedor: *argiles Colades S.A. del sector de La Bisbal d'Empordà (Girona-Barcelona)* (Detalles - Anexo 6.6.4.2).

3.5.4.3 Análisis por difracción de rayos X (DRX) de arcilla Tipo D

La descripción del análisis por difracción de rayos X (DRX) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por difracción de rayos X (DRX). Se realizó la DRX de la arcilla tipo D (Caolín MD-25) tanto de la roca total como de la fracción arcilla. Las DRX de la fracción de arcilla fueron realizadas por el *Dr. Juan Diego Martín Martín del Dpt. Mineralogía, Petrología i Geologia Aplicada de la Universitat de Barcelona* (Anexo 6.6.4.3) y se dividen en DRX normal y DRX orientadas. Los resultados de las DRX de la fracción arcilla se muestran en:

a) Interpretación e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación catalogando los minerales (Fig. 6.6.4.3.1 y Fig. 6.6.4.3.2); b) Diagrama DRX secado al aire (normal) (Detalles-Anexo 6.6.4.3); c) Gráfico DRX de los tres diagramas superpuestos (Anexo 6.6.4.3).

Los análisis DRX de la fracción de arcilla (Fig. 6.6.4.3.1 y Fig. 6.6.4.3.2) evidencian la presencia de cuarzo, arcillas, feldespato alcalino potásico, illita y caolinita. En lo referente al mineral de arcilla dominante se interpreta que es la caolinita seguida por la illita.

Por otra parte se realizó una interpretación complementaria de los resultados de las DRX de la roca total mediante el software *X'Pert HighScore (PANalytical)* (Anexo 6.6.1.3) que evidencia la presencia dominante de cuarzo y caolinita. En ambas interpretaciones se encuentran importantes cantidades de óxido de silicio en el cuarzo y caolinita; óxido de aluminio en la caolinita y haloisita. También se detecta la presencia de calcio, potasio y agua.

Esta información se complementa con los resultados de la fluorescencia de rayos X expuesto más adelante.

Interpretación e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación - Arcilla D

Muestra A	Simbología	Ubicación
Cuarzo	(Q)	3,34 Å - 4,26 Å
Feldespato alcalino-potásico	(Fk)	3,25 Å
Illita	(I)	10 - 5 Å
Caolinita	(K)	7,15 - 3,58 Å

Caolinita > Illita

Total			Minerales de arcilla	
Q	Fk	Clay	K	I
***	*	**	***	*
(En la roca total de la tabla no se cuantifica los minerales de la arcillas por separado y se ha usado "Clay")			*** Dominante	
			** Abundante	
			* Presente	

Fig. 6.6.4.3.2 Interpretación DRX e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación catalogando los minerales (arcillas).

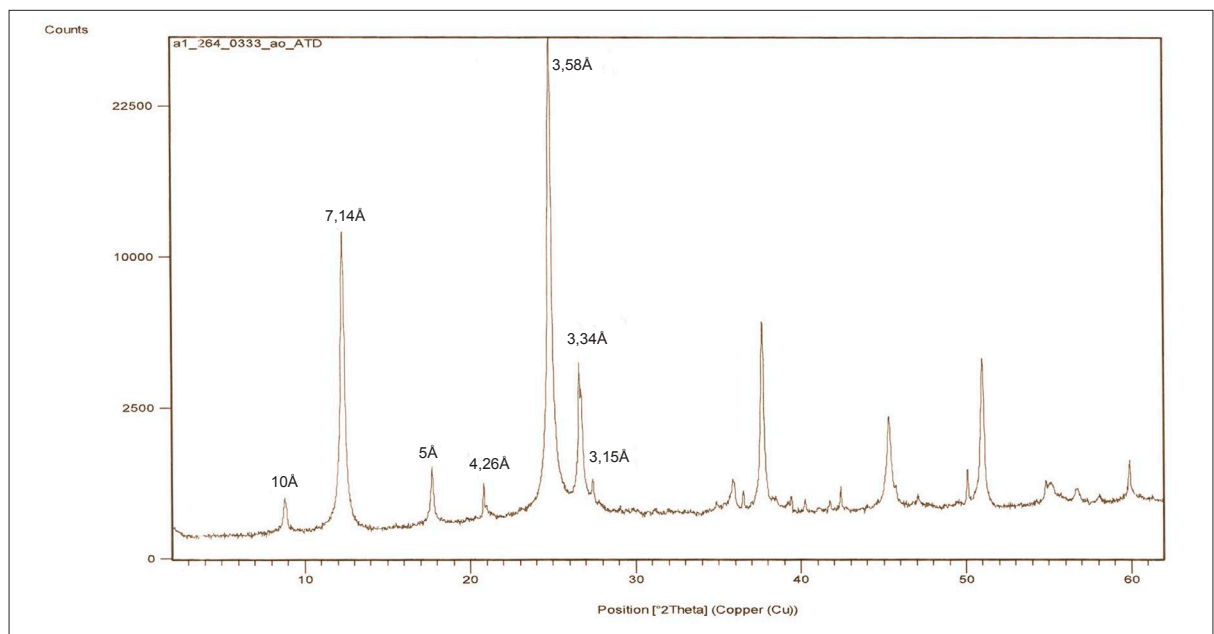


Fig. 6.6.4.3.1 Interpretación de análisis DRX e identificación de los picos de las muestras y los minerales (arcillas) (Dr. Juan Diego Martín).

3.5.4.4 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo D

El procedimiento de análisis termogravimétrico (ATG) se explica en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos: Análisis termogravimétrico (ATG). El peso de la muestra analizada fue de 21,95mg. El resultado obtenido mediante ATG en aire, la derivada de la pérdida de masa respecto a la temperatura (DTG), y el flujo de calor de peso corregido se muestra en la gráfica de la Fig.6.6.4.4.1 La señal DTG se emplea para establecer los rangos de temperatura en los que tienen lugar las transformaciones.

En la gráfica ATG se observa un primer pico entre los 50°C (P1) y un segundo pico a los 100°C. Ambos picos son producto de la pérdida de agua higroscópica que se encuentra libre y no afectan a la estructura de la arcilla. Durante el trayecto desde los 100 hasta los 250°C (P2) se puede observar una serie de picos y una pérdida de temperatura gradual. Este fenómeno se relaciona

con la presencia mayoritaria de caolinita y la pérdida del agua ubicada en los mesoporos y entre las capas de dichos minerales, además del inicio de la pérdida del agua de hidratación.

En los siguientes saltos, entre las temperaturas de 440 (P3) y 640°C (P4) y entre los 820 (P5) y los 940°C (P6) se observan varios picos y pérdida de peso. Esto se debe a que los iones OH- empiezan a ser liberados de la red cristalina en forma de vapor de agua generando, en el caso de la caolinita el rompimiento de la estructura cristalina para dar paso a la fase amorfa o metacaolín ($Al_2Si_2O_7$), este fenómeno se prolonga hasta los 700°C en donde el cuarzo sufre transformación desde los 573 °C y la caolinita presente en la arcilla ha sido deshidroxilada hasta los 600°C convirtiéndose en metacaolín. El pico máximo obtenido mediante el software de análisis fue a los 514,83°C. Se concluye que las arcillas Tipo D presentan un comportamiento típico de arcillas caoliniticas o caolines, lo cual corrobora la información de los análisis DRX y FRX.

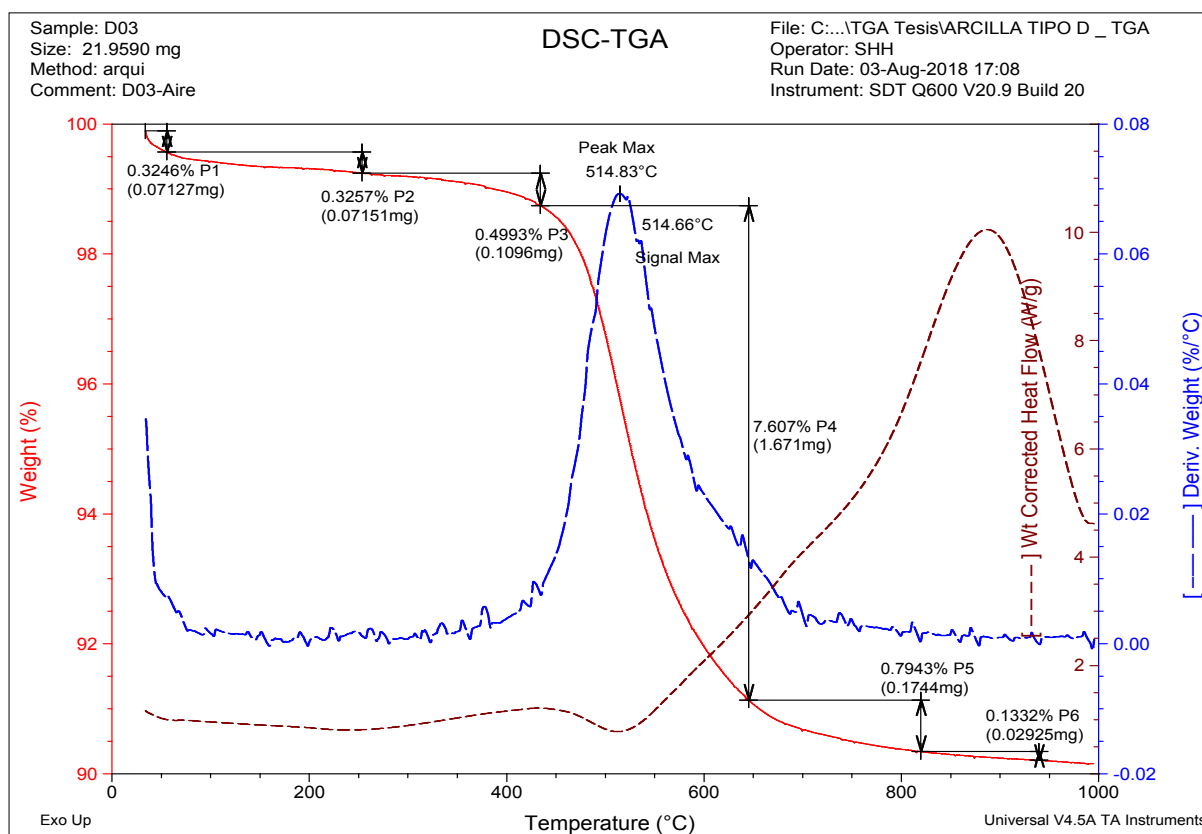


Fig. 6.6.4.4.1 Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo D.

3.5.4.5 Fluorescencia de rayos X (FRX) de arcilla Tipo D

La descripción del análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX). El análisis FRX de la arcilla Tipo D evidenció la presencia de alto contenido de SiO₂ (56% aproximadamente) y Al₂O₃ (31% aproximadamente). También se encontró Fe₂O₃, TiO₂, CaO, y otros elementos que se detallan en la tabla de la figura 6.6.4.5.1 y de la figura 6.6.4.5.2.

La relación SiO₂/Al₂O₃ es igual a 1,823 lo cual influye directamente en las características mecánicas de los geopolímeros fabricados a partir de esta materia prima.

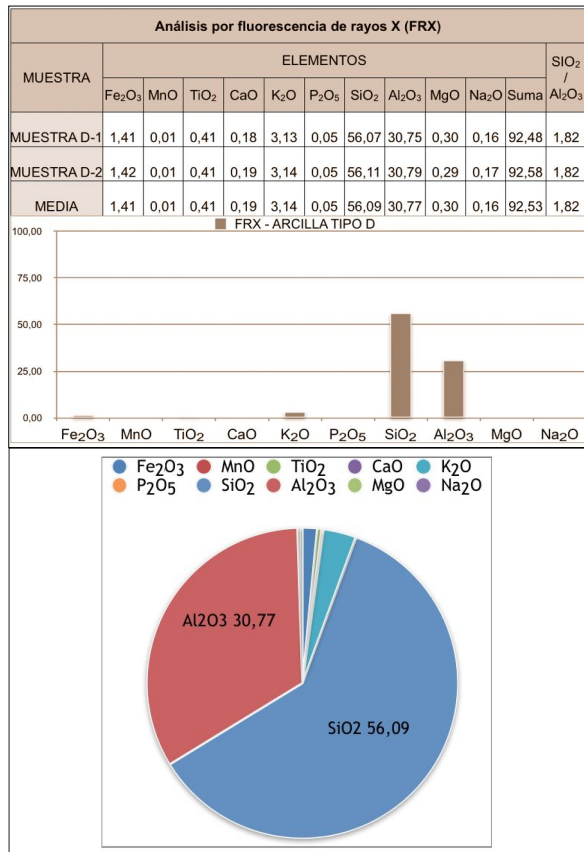


Fig. 6.6.4.5.1 Análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) y la cuantificación de los compuestos químicos.

3.5.4.6 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo D

La descripción del análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis ADL. La cantidad residual (0,84% <1%) muestra que se ajustaron los datos calculados a los datos de medición correctamente.

9,74μm es el tamaño en el que el 50% de la muestra es más pequeño y el 50% es más grande. Este valor también se conoce como el diámetro mediano de masa (MMD) o la mediana de la distribución del volumen. 2,68μm es el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 10% de la muestra. 30,72μm es el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 90% de la muestra. 13,73μm es la media ponderada por volumen o la media del momento de masa. 5.50μm es la media ponderada en la superficie, también conocida como la media del diámetro del momento de la superficie o la media de Sauter.

2.87 es la medida del ancho de la distribución. Cuanto más estrecha es la distribución, menor es el intervalo. 0,01%vol. es la concentración de volumen. 0,88 es la medida de la desviación absoluta de la mediana. 1,09m²/g es el área de superficie específica (SSA): el área total de las partículas dividida por el peso total.

El gráfico ADL correspondiente se observa en la Fig. 6.6.4.6.1 y los detalles se encuentran en el anexo 6.6.4.6).

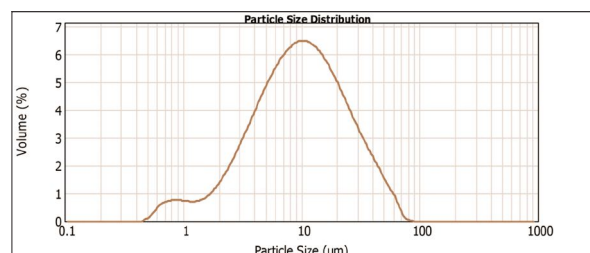


Fig. 6.6.4.6.1 Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo D.

3.5.4.7 Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) de arcilla Tipo D

La descripción del análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) se encuentra en el apartado 6.4: Descripción de análisis y ensayos, sección Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Mediante las microscopías se observaron los diferentes hábitos de los principales cristales: cuarzo, caolinita e illita dispuestos en agregados de 5 a 15µm (Fig. 6.6.4.7.1 y Fig. 6.6.4.7.6), partículas de 1 a 2µm (Fig. 6.6.4.7.2) y placas nanométricas (Fig. 6.6.4.7.6).

También se observa que las estructuras típicas (Capítulo 2: Las arcillas) han sido alteradas por

miconización, por tanto el ordenamiento estructural de los aglomerados es irregular. Los agregados y partículas de arcilla están aleatoriamente adheridos a partículas de cuarzo de mayor tamaño. Pese a ello se observa la geometría prismática de las placas características de las caolinitas alteradas y dispersas por acción mecánica tal como se observa en las imágenes (Fig. 6.6.4.7.6).

Las microscopías confirman los resultados de los análisis ADL en cuanto al tamaño de partículas de la arcilla tipo D. El análisis cuantitativo recogido en los espectros 17 (Fig. 6.6.4.7.4) y 18 (Fig. 6.6.4.7.5) y en la tabla de la Fig. 6.6.4.7.3 ratifican la presencia dominante de sílice y aluminio y menores cantidades de Mg, Ca, Fe y K lo cual corrobora la información de los análisis DRX y FRX (Detalles - Anexo 6.6.4.7).

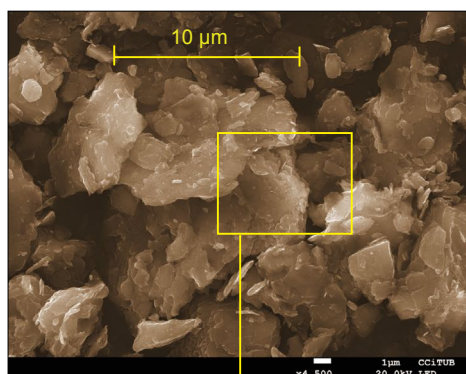


Fig. 6.6.4.7.1 Microscopía (SEM).

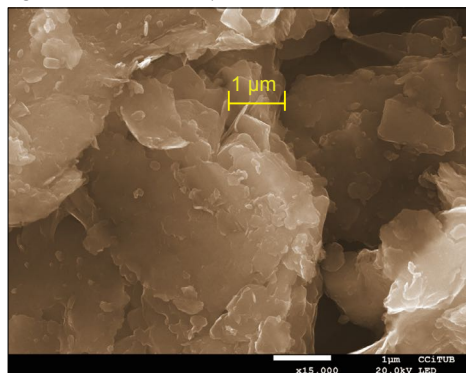


Fig. 6.6.4.7.2 Microscopía (SEM).

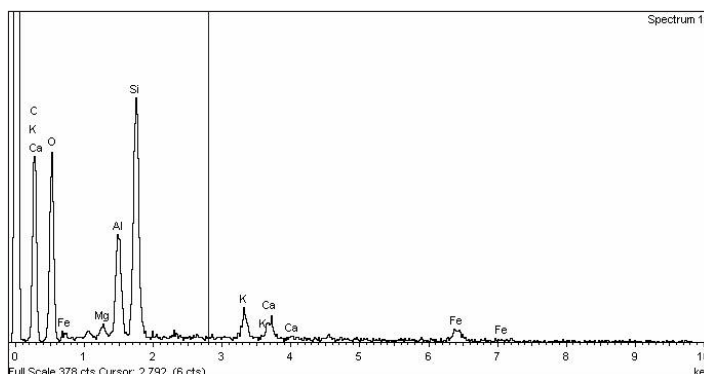


Fig. 6.6.4.7.4 Espectro 17 - Análisis SEM - Cuantitativo.

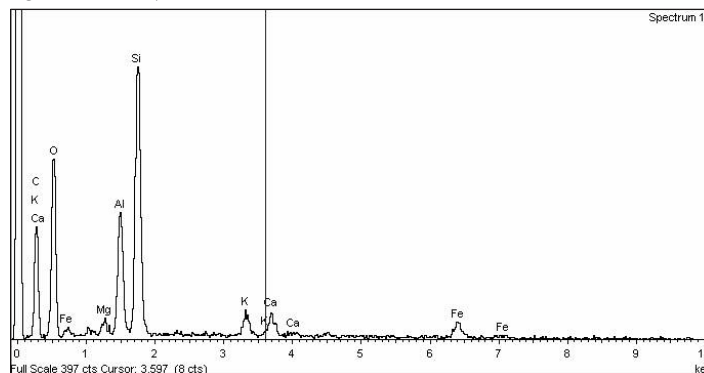


Fig. 6.6.4.7.5 Espectro 18 - Análisis SEM - Cuantitativo.

Análisis SEM - Cuantitativo - Arcilla Tipo D												
Processing option : Oxygen by stoichiometry (Normalised)												
Spectrum	In	C	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	O	Total
Spectrum 17	Yes	23.06	0.23	1.91	4.31		0.57	0.46		0.74	68.72	100.00
Spectrum 18	Yes	20.62	0.37	2.97	6.83		0.70	0.73		1.37	66.41	100.00

Fig. 6.6.4.7.3 Análisis SEM - Cuantitativo.

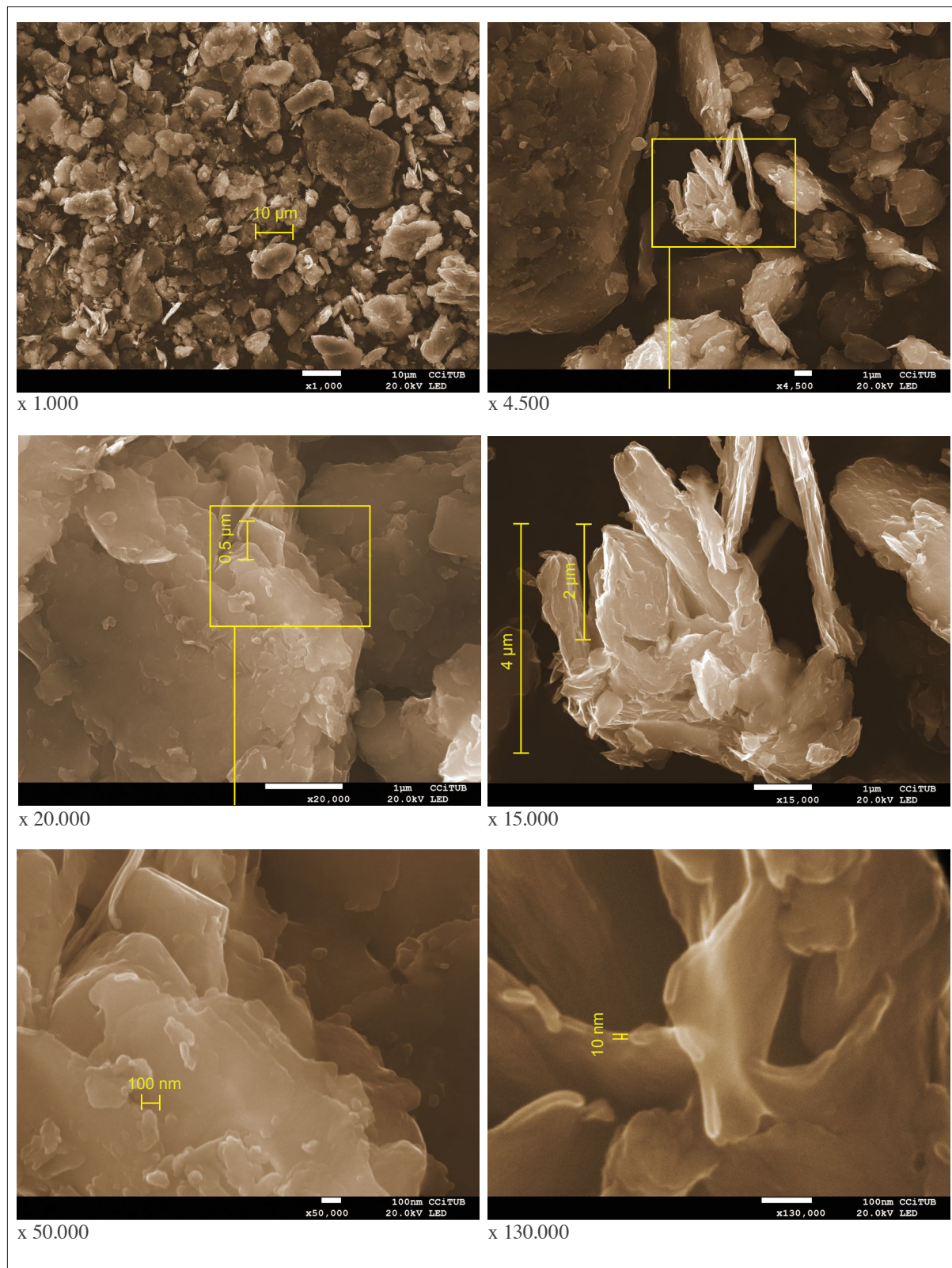


Fig. 6.6.4.7.6 Microscopías (SEM) Arcilla Tipo D.

3.5.5 Comparación de los diferentes tipos de arcillas

La arcilla Tipo A tiene un límite líquido de 34,2%; un límite plástico de 20,3%; y un índice de plasticidad de 13,9%. Está compuesta principalmente por minerales de cuarzo, el tipo de arcilla dominante es la caolinita con abundante illita y la presencia

de clorita. Está principalmente compuesta por un 64% de SiO_2 y un 25% de Al_2O_3 y en menores cantidades: Fe_2O_3 , MnO , TiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 , MgO y Na_2O . En lo referente a la granulometría: $9,80\mu\text{m}$ es el tamaño en el que el 50% de la muestra es más pequeño y el 50% es más grande y $21,58\mu\text{m}$ es la media ponderada por volumen. La arcilla Tipo A guarda una relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ igual a 2,61.

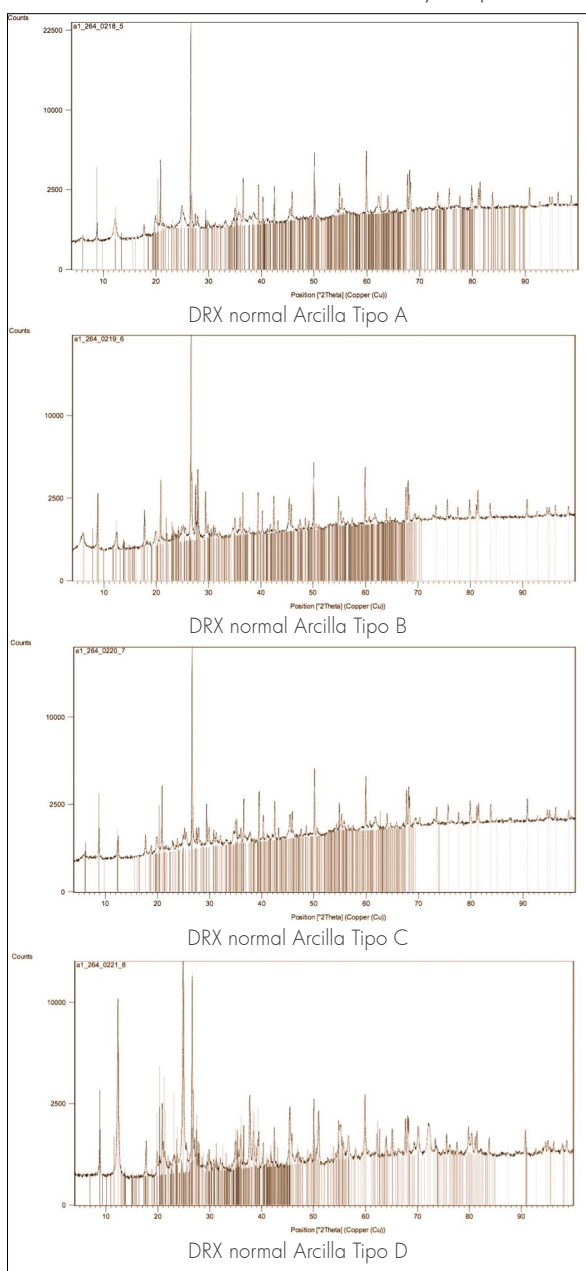


Fig. 6.6.5.1 Comparación de las gráficas DRX de las diferentes arcillas utilizadas en la campaña experimental.

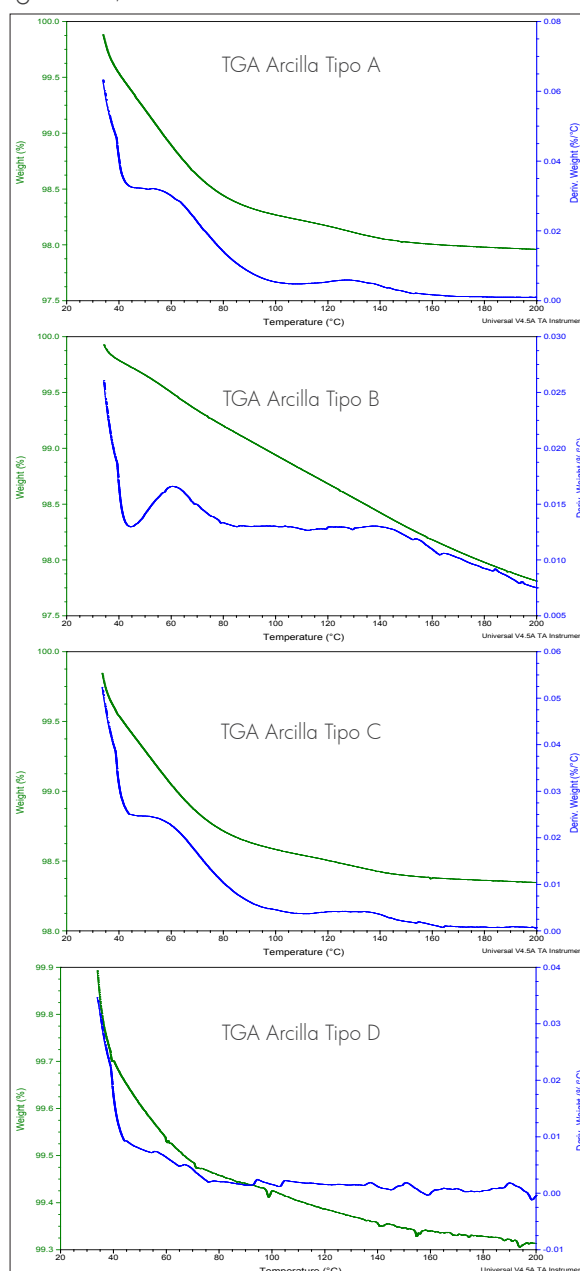


Fig. 6.6.5.2 Comparación de las gráficas TGA hasta los 200°C de las diferentes arcillas utilizadas en la campaña experimental.

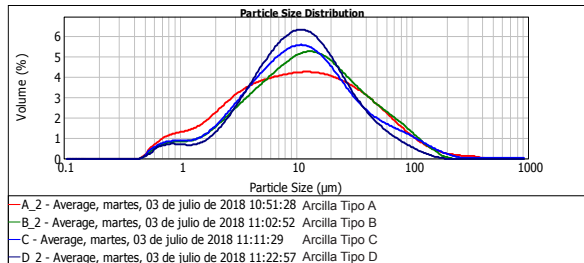


Fig. 6.6.5.3 Comparación de las gráficas ADL de las diferentes arcillas utilizadas en la campaña experimental.

La arcilla Tipo B tiene un límite líquido de 40,8%; un límite plástico de 25,4%; y un índice de plasticidad de 15,4%. Está compuesta principalmente por minerales de cuarzo, el tipo de arcilla dominante es la illita, con abundante caolinita y la presencia de clorita. Está principalmente compuesta por un 63% de SiO_2 y un 18% de Al_2O_3 y en menores cantidades: Fe_2O_3 , MnO , TiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 , MgO y Na_2O . En lo referente a la granulometría: 11,31µm es el tamaño en el que el 50% de la muestra es más pequeño y el 50% es más grande y 21,29µm es la media ponderada por volumen. La relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es igual a 3,475.

La arcilla Tipo C tiene un límite líquido de 36,0; un límite plástico de 22,4; y un índice de plasticidad de 13,6. Está compuesta principalmente por minerales de cuarzo, el tipo de arcilla dominante es la illita, con abundante caolinita y la presencia de clorita. Está principalmente compuesta por un 62% de SiO_2 y un 19% de Al_2O_3 y en menores cantidades: Fe_2O_3 , MnO , TiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 , MgO y Na_2O . En lo referente a la granulometría: 10,62µm es el tamaño en el que el 50% de la muestra es más pequeño y el 50% es más grande y 21,61µm es la media ponderada por volumen. La relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es igual a 3,187.

La arcilla Tipo D tiene un límite líquido de 47,9%; un límite plástico de 35,3%; y un índice de plasticidad de 12,6%. Está compuesta principalmente por minerales de cuarzo, el tipo de arcilla dominante es la caolinita con la presencia de illita. Está principalmente compuesta por un 61% de SiO_2 y un 33% de Al_2O_3 ; y en menores cantidades: Fe_2O_3 , MnO , TiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 , MgO y Na_2O . En lo referente a la granulometría: 9,74µm es el tamaño en el que el 50% de la muestra es

más pequeño y el 50% es más grande y 13,73µm es la media ponderada por volumen. La relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es igual a 1,823.

3.6 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos parte de los criterios recolectados del estado del arte. Se consideraron variables los porcentajes de los materiales precursores (arcilla, arena, agua y los diferentes aditivos alcalinos) y las condiciones de curado (temperatura y tiempo). Los procedimientos de fabricación de las probetas (característica y tiempo de amasado, instrumentos utilizados, procedimientos de relleno de moldes, etc.) fueron los mismos en todos los casos y se detallan en el Anexo 5.0.

El estudio experimental se dividió en dos partes. La primera parte consistió en experimentos diseñados con el afán de analizar los datos del comportamiento de las variables mediante el diseño de experimentos DOE (*Design of Experiment*) por método factorial. La segunda parte constituyó una campaña experimental con varias pruebas piloto que sirvieron para probar diferentes dosificaciones y aditivos.

Los experimentos se diseñaron a partir de las experiencias recolectadas en ensayos preliminares y el estado del arte. Esta etapa se dividió en cinco campañas (GEO-A, GEO-B, GEO-C, GEO-D, GEO-E) con un total de 88 mezclas y 264 probetas fabricadas. El objetivo de las campañas GEO-A,B,C y D fue determinar el rol de las diferentes variables que intervienen en el comportamiento mecánico del material a partir de la arcilla Tipo A. En la campaña GEO-D, a diferencia de las campañas anteriores, se analiza el rol que cumple la "cal viva", como captador de agua y generador de calor, en la resistencia mecánica final de las muestras. El objetivo de la campaña GEO-E fue

determinar el comportamiento de diferentes tipos de arcilla (Tipo A, B, C y D) ante condiciones de polimerización constante. Por otra parte, en este apartado también se incluye la campaña GEO-FP: Estas muestras fueron fabricadas con el propósito de realizar análisis complementarios de caracterización del material geopolimerizado.

Los experimentos de esta etapa se diseñaron mediante la aplicación del software Minitab 17 con un diseño de experimentos (DOE) de tipo factorial de segundo nivel (2^k). Todas las probetas, fabricadas bajo diferentes condiciones y dosificaciones tanto en la primera como en la segunda parte experimental, fueron ensayadas a flexión y compresión. La resistencia a compresión se utilizó como variable de respuesta mediante la cual posteriormente se evaluó el rol de las diferentes variables que intervinieron y se determinaron las dosificaciones más favorables. Las particularidades

de cada una de las campañas y los diferentes diseños de experimentos (DOE) se exponen a continuación.

3.6.1 Campaña experimental GEO-A

El diseño de la campaña experimental GEO-A tiene como objetivo determinar el rol de cinco variables: activador alcalino (Agua+NaOH) concentración molar de hidróxido de sodio (NaOH); Na_2SiO_3 , temperatura y tiempo de curado a temperatura inicial en relación a la variable de referencia, la resistencia a compresión.

El diseño del experimento (DOE) desarrollado en esta etapa (mediante el software Minitab 17) es factorial completo de dos niveles (2^k). Partiendo de estas premisas en la tabla (Fig.6.7.1.2) se presenta la campaña experimental GEO-A, con un total de 32 corridas y 96 probetas fabricadas (Fig.6.7.1.1).



Fig. 6.7.1.1 Probetas de ensayo GEO-A.

Campaña - ENSAYO GEO-A								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	RB	°C CT	Horas H
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT80-H2	GEO-A01	1,00	1,00	0,33	5	0,04	80	2
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT80-H2	GEO-A02	1,00	1,00	0,37	5	0,04	80	2
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT80-H2	GEO-A03	1,00	1,00	0,28	10	0,04	80	2
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT80-H2	GEO-A04	1,00	1,00	0,31	10	0,04	80	2
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT80-H2	GEO-A05	1,00	1,00	0,33	5	0,08	80	2
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT80-H2	GEO-A06	1,00	1,00	0,37	5	0,09	80	2
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT80-H2	GEO-A07	1,00	1,00	0,28	10	0,08	80	2
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT80-H2	GEO-A08	1,00	1,00	0,31	10	0,09	80	2
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT120-H2	GEO-A09	1,00	1,00	0,33	5	0,04	120	2
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT120-H2	GEO-A10	1,00	1,00	0,37	5	0,04	120	2
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT120-H2	GEO-A11	1,00	1,00	0,28	10	0,04	120	2
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT120-H2	GEO-A12	1,00	1,00	0,31	10	0,04	120	2
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT120-H2	GEO-A13	1,00	1,00	0,33	5	0,08	120	2
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT120-H2	GEO-A14	1,00	1,00	0,37	5	0,09	120	2
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT120-H2	GEO-A15	1,00	1,00	0,28	10	0,08	120	2
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT120-H2	GEO-A16	1,00	1,00	0,31	10	0,09	120	2
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT80-H4	GEO-A17	1,00	1,00	0,33	5	0,04	80	4
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT80-H4	GEO-A18	1,00	1,00	0,37	5	0,04	80	4
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT80-H4	GEO-A19	1,00	1,00	0,28	10	0,04	80	4
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT80-H4	GEO-A20	1,00	1,00	0,31	10	0,04	80	4
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT80-H4	GEO-A21	1,00	1,00	0,33	5	0,08	80	4
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT80-H4	GEO-A22	1,00	1,00	0,37	5	0,09	80	4
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT80-H4	GEO-A23	1,00	1,00	0,28	10	0,08	80	4
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT80-H4	GEO-A24	1,00	1,00	0,31	10	0,09	80	4
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT120-H4	GEO-A25	1,00	1,00	0,33	5	0,04	120	4
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT120-H4	GEO-A26	1,00	1,00	0,37	5	0,04	120	4
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT120-H4	GEO-A27	1,00	1,00	0,28	10	0,04	120	4
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT120-H4	GEO-A28	1,00	1,00	0,31	10	0,04	120	4
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT120-H4	GEO-A29	1,00	1,00	0,33	5	0,08	120	4
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT120-H4	GEO-A30	1,00	1,00	0,37	5	0,09	120	4
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT120-H4	GEO-A31	1,00	1,00	0,28	10	0,08	120	4
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT120-H4	GEO-A32	1,00	1,00	0,31	10	0,09	120	4

Fig. 6.7.1.2 Cuadro de materiales utilizados en la campaña GEO-A. La Arcilla Tipo A tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 20°C durante 28 días antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.

3.6.2 Campaña experimental GEO-B

El diseño de la campaña experimental GEO-B tiene como objetivo determinar el rol de tres variables: el tipo de activador alcalino (NaOH o KOH), la concentración molar del activador alcalino y el

porcentaje de Na₂SiO₃ en relación a la variable de referencia, la resistencia a compresión.

El diseño del experimento (DOE) desarrollado (mediante el software Minitab 17) en esta etapa es factorial completo de dos niveles (2^k). En la tabla

(Fig.6.7.2.1) se presenta la campaña experimental GEO-B, dividida en dos partes, con un total de 8 corridas y 24 probetas fabricadas (Fig.6.7.2.2).

3.6.3 Campaña experimental GEO-C

El diseño de la campaña experimental GEO-C tiene como objetivo analizar: el comportamiento de KOH como activador alcalino, la influencia de la concentración molar, la influencia de la adición de Na_2SiO_3 y el tiempo de exposición a temperatura en función a la variable de referencia,

la resistencia a compresión del material resultante. La campaña experimental GEO-C se divide en seis partes: Ensayo GEO-C1; GEO-C2; GEO-C3; GEO-C4; GEO-C5 y GEO-C6 los cuales se explican a continuación.

Campaña GEO-C1

El diseño del experimento GEO-C1 tiene como objetivo comparar el comportamiento a la resistencia a la compresión de probetas fabricadas con diferente porcentaje de activador alcalino

Campaña - ENSAYO GEO-B (NaOH)								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na_2SiO_3	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	RB	°C	Horas
ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-B01	1,00	1,00	0,30	10	0,00	80	24
ATA-A1-RA0,3-NM5-CT80-H24	GEO-B02	1,00	1,00	0,30	5	0,00	80	24
ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,08-CT80-H24	GEO-B05	1,00	1,00	0,30	10	0,08	80	24
ATA-A1-RA0,3-NM5-RB0,07-CT80-H24	GEO-B06	1,00	1,00	0,30	5	0,07	80	24

Campaña - ENSAYO GEO-B (KOH)								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Na_2SiO_3	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	KM	RB	°C	Horas
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24	GEO-B03	1,00	1,00	0,30	10	0,00	80	24
ATA-A1-RA0,3-KM5-CT80-H24	GEO-B04	1,00	1,00	0,30	5	0,00	80	24
ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-B07	1,00	1,00	0,30	10	0,09	80	24
ATA-A1-RA0,3-KM5-RB0,08-CT80-H24	GEO-B08	1,00	1,00	0,30	5	0,08	80	24

Fig. 6.7.2.1 Cuadro de materiales utilizados en la campaña GEO-B. La Arcilla Tipo A tiene un ratio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 20°C durante 14 días antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.



Fig. 6.7.2.2 Probetas de ensayo GEO-B.

(KOH + H₂O). Los otros factores que intervienen se mantienen constantes: concentración molar 10M, 80°C de temperatura durante 24 horas de exposición. Partiendo de esto, en la Tabla de la Fig. 6.7.3.1 se presenta el diseño experimental con un total de 4 corridas y 12 probetas fabricadas (Fig. 6.7.3.1a).

Campaña GEO-C2

El diseño del experimento GEO-C2, a diferencia

del experimento GEO-C1, tiene como objetivo comparar el comportamiento a la resistencia a la compresión de probetas fabricadas con diferente porcentaje de activador alcalino (KOH + H₂O) con la adición de Na₂SiO₃. Los otros factores que intervienen se mantienen constantes: concentración molar 10M, 80°C de temperatura durante 24 horas de exposición. Partiendo de esto, en la Tabla de la Fig. 6.7.3.2 se presenta el diseño experimental con un total de 4 corridas y 12 probetas fabricadas (Fig. 6.7.3.2a).

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-C1								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico		
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATA	A	RA	KM	°C	Horas	
		CT	H					
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24	GEO-C1 01	1,00	1,00	0,30	10	80	24	
ATA-A1-RA0,34-KM10-CT80-H24	GEO-C1 02	1,00	1,00	0,34	10	80	24	
ATA-A1-RA0,38-KM10-CT80-H24	GEO-C1 03	1,00	1,00	0,38	10	80	24	
ATA-A1-RA0,42-KM10-CT80-H24	GEO-C1 04	1,00	1,00	0,42	10	80	24	

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-C2								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	KM	RB	°C	Horas
		CT	H					
ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-C2 01	1,00	1,00	0,30	10	0,09	80	24
ATA-A1-RA0,34-KM10-RB0,11-CT80-H24	GEO-C2 02	1,00	1,00	0,34	10	0,11	80	24
ATA-A1-RA0,38-KM10-RB0,12-CT80-H24	GEO-C2 03	1,00	1,00	0,38	10	0,12	80	24
ATA-A1-RA0,42-KM10-RB0,13-CT80-H24	GEO-C2 04	1,00	1,00	0,42	10	0,13	80	24

Fig. 6.7.3.1 y Fig. 6.7.3.2 Cuadro de materiales utilizados en la campaña GEO-C1 y GEO-C2 respectivamente. La Arcilla Tipo A tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 30°C durante 14 días antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.

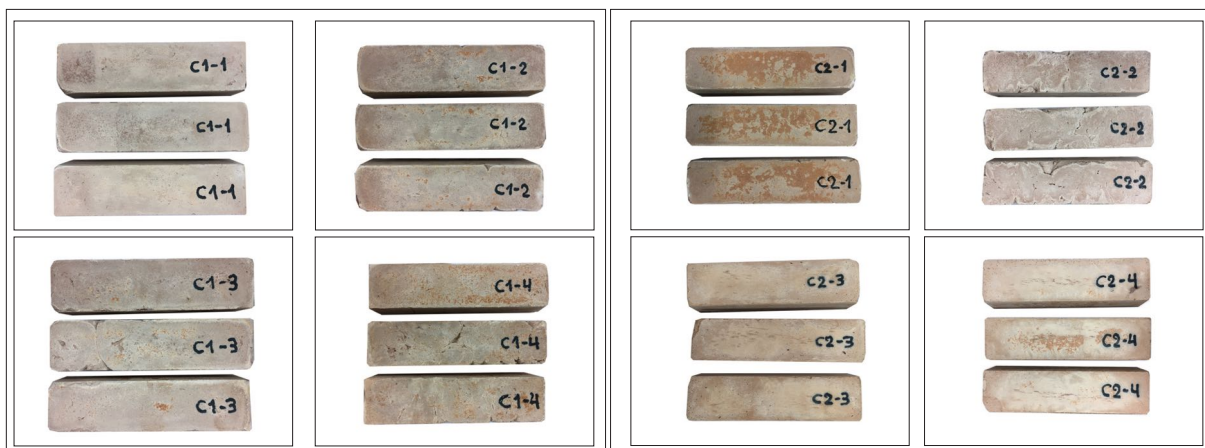


Fig. 6.7.3.1a Probetas de ensayo GEO-C1.

Fig. 6.7.3.2a Probetas de ensayo GEO-C2.

Campaña GEO-C3

El diseño del experimento GEO-C3 tiene como objetivo comparar el comportamiento a la resistencia a la compresión de probetas fabricadas con diferente tiempo de exposición a temperatura. Para ello se prueban cuatro niveles: 0 (es decir sin utilización de estufa), 7, 14 y 24 horas de exposición a 80°C. Los otros factores que intervienen se mantienen constantes. En la Tabla de la Fig. 6.7.3.3 se presenta el diseño experimental con un total de 4 corridas y 12 probetas fabricadas (Fig. 6.7.3.3a).

Campaña GEO-C4

El diseño del experimento GEO-C4, a diferencia del experimento GEO-C3, tiene como objetivo comparar el comportamiento a la resistencia a la compresión de probetas fabricadas con diferente tiempo de exposición a temperatura con la adición de Na_2SiO_3 . Se prueban cuatro niveles: 0 (sin utilización de estufa), 7, 14 y 24 horas de exposición a 80°C. Los otros factores se mantienen constantes. En la Tabla de la Fig. 6.7.3.4 se presenta el diseño experimental con un total de 4 corridas y 12 probetas fabricadas (Fig. 6.7.3.4a).

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-C3								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico		
		Arcilla Tipo A	Arena sílicea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATA	A	RA	KM	°C CT	Horas H	
ATA-A1-RA0,3-KM10	GEO-C3 01	1,00	1,00	0,30	10	-	-	
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H7	GEO-C3 02	1,00	1,00	0,30	10	80	7	
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H14	GEO-C3 03	1,00	1,00	0,30	10	80	14	
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24	GEO-C3 04	1,00	1,00	0,30	10	80	24	

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-C4								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena sílicea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Na_2SiO_3	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	KM	RB	°C CT	Horas H
ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-C4 01	1,00	1,00	0,30	10	0,09	-	-
ATA-A1-RA0,34-KM10-RB0,11-CT80-H24	GEO-C4 02	1,00	1,00	0,34	10	0,09	80	7
ATA-A1-RA0,38-KM10-RB0,12-CT80-H24	GEO-C4 03	1,00	1,00	0,38	10	0,09	80	14
ATA-A1-RA0,42-KM10-RB0,13-CT80-H24	GEO-C4 04	1,00	1,00	0,42	10	0,09	80	24

Fig. 6.7.3.3 y Fig. 6.7.3.4. Cuadro de materiales utilizados en la campaña GEO-C3 y GEO-C4 respectivamente. La Arcilla Tipo A tiene un ratio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 30°C durante 14 días antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.

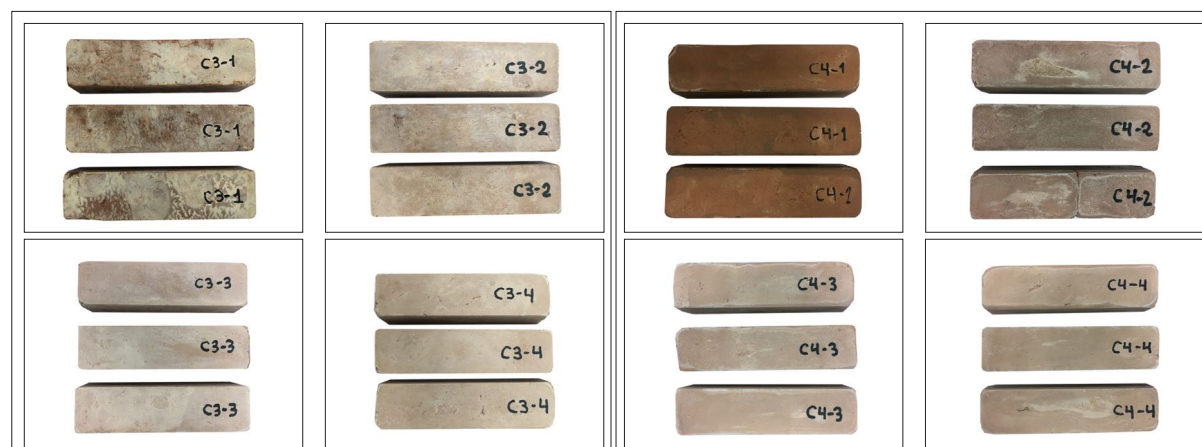


Fig. 6.7.3.3a Probetas de ensayo GEO-C3.

Fig. 6.7.3.4a Probetas de ensayo GEO-C4.

Campaña GEO-C5

El diseño del experimento GEO-C5 tiene como objetivo comparar el comportamiento a la resistencia a la compresión de probetas fabricadas con diferente concentración molar de KOH. Para ello se prueban cuatro niveles: 8M, 10M, 12M y 14M. Los otros factores que intervienen se mantienen constantes: activador alcalino (KOH + H₂O); 80°C de temperatura durante 24 horas de exposición. En la Tabla de la Fig. 6.7.3.5 se presenta el diseño experimental con un total de 4 corridas y 12 probetas fabricadas (Fig. 6.7.3.5a).

Campaña GEO-C6

El diseño del experimento GEO-C6, a diferencia del experimento GEO-C5, tiene como objetivo comparar el comportamiento a la resistencia a la compresión de probetas fabricadas con diferente concentración molar de KOH más la adición de Na₂SiO₃. Para ello se prueban cuatro niveles: 8M, 10M, 12M y 14M (KOH). Los otros factores que intervienen se mantienen constantes. Partiendo de esto, en la Tabla de la Fig. 6.7.3.6 se presenta el diseño experimental con un total de 4 corridas y 12 probetas fabricadas (Fig. 6.7.3.6a).

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-C5								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico		
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATA	A	RA	KM	°C	Horas	
ATA-A1-RA0,3-KM8-CT80-H24	GEO-C5 01	1,00	1,00	0,30	8	80	24	
ATA-A1-RA0,28-KM10-CT80-H24	GEO-C5 02	1,00	1,00	0,28	10	80	24	
ATA-A1-RA0,26-KM12-CT80-H24	GEO-C5 03	1,00	1,00	0,26	12	80	24	
ATA-A1-RA0,24-KM14-CT80-H24	GEO-C5 04	1,00	1,00	0,24	14	80	24	

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-C6								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	KM	RB	°C	Horas
ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-C6 01	1,00	1,00	0,30	8	0,09	80	24
ATA-A1-RA0,34-KM10-RB0,11-CT80-H24	GEO-C6 02	1,00	1,00	0,28	10	0,09	80	24
ATA-A1-RA0,38-KM10-RB0,12-CT80-H24	GEO-C6 03	1,00	1,00	0,26	12	0,09	80	24
ATA-A1-RA0,42-KM10-RB0,13-CT80-H24	GEO-C6 04	1,00	1,00	0,24	14	0,09	80	24

Fig. 6.7.3.5 y Fig. 6.7.3.6 Cuadro de materiales utilizados en la campaña GEO-C5 y GEO-C6. La Arcilla Tipo A tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 30°C durante 14 días antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.



Fig. 6.7.3.5a Probetas de ensayo GEO-C5.

Fig. 6.7.3.6a Probetas de ensayo GEO-C6.

3.6.4 - Campaña experimental GEO-D

El diseño de la campaña experimental GEO-D tiene como objetivo analizar la influencia de la adición de “cal viva” (CaO), como estabilizante adicional. El objetivo de este ensayo es analizar si la “cal viva” puede actuar como agente “captador de agua” y generador de temperatura en el proceso de geopolimerización. La campaña GEO-D se divide en dos partes que se detallan a continuación.

Campaña GEO-D1

Se experimenta la adición de “cal viva” (CaO) en diferentes proporciones. En la tabla de la Fig.6.7.4.1 se presenta el diseño experimental con un total de 4 corridas y 12 probetas (Fig. 6.7.4.1a).

Campaña GEO-D2

A diferencia de la campaña GEO-D1 esta campaña tiene como objetivo comparar el comportamiento de probetas fabricadas sin la utilización de estufa. En la tabla de la Fig. 6.7.4.2 se presenta el diseño experimental con un total de 4 corridas y 12 probetas (Fig. 6.7.4.2a).

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-D1								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo C	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silíceas	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Cal viva	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	KM	RC ₄	°C	Horas
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,06-CT80-H24	GEO-D1 01	1,00	1,00	0,32	10	0,06	80	24
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,10-CT80-H24	GEO-D1 02	1,00	1,00	0,32	10	0,10	80	24
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,14-CT80-H24	GEO-D1 03	1,00	1,20	0,32	10	0,14	80	24
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,18-CT80-H24	GEO-D1 04	1,00	1,00	0,32	10	0,18	80	24

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-D2								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo C	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silíceas	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Cal viva	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	KM	RC ₄	°C	Horas
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,06	GEO-D2 01	1,00	1,00	0,32	10	0,06	-	-
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,10	GEO-D2 02	1,00	1,00	0,32	10	0,10	-	-
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,14	GEO-D2 03	1,00	1,20	0,32	10	0,14	-	-
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,18	GEO-D2 04	1,00	1,00	0,32	10	0,18	-	-

Fig. 6.7.4.1 y Fig. 6.7.4.2 Cuadro de materiales utilizados en la campaña GEO-D1 y GEO-D2 respectivamente. La Arcilla Tipo A tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 30°C durante 14 días antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.



Fig. 6.7.4.1a Probetas de ensayo GEO-D1.



Fig. 6.7.4.2a Probetas de ensayo GEO-D2.

3.6.5 - Campaña experimental GEO-E

El objetivo de esta campaña es analizar el comportamiento de diferentes tipos de arcillas. La campaña GEO-E se divide en seis partes: GEO-E1, GEO-E2, GEO-E3, GEO-E4, GEO-E5 y GEO-E6 que se detallan a continuación.

Campaña GEO-E1

Este experimento tiene como objetivo analizar el comportamiento de la Arcilla Tipo B bajo la acción de diferente proporción de activador alcalino a base de KOH con concentración molar de 10M y 14M. Se mantienen el resto de factores constantes tal como se muestra en la Tabla de la Fig. 6.7.5.1 con un total de 2 corridas y 6 probetas fabricadas (Fig. 6.7.5.1a).

Campaña GEO-E2

Este experimento tiene como objetivo analizar el comportamiento de la Arcilla Tipo B bajo la acción de diferente proporción de activador alcalino a base de KOH con concentración molar de 10M y 14M más silicato de sodio. Se mantienen el resto de factores constantes. En la Tabla de la Figura 6.7.5.2 se expone el diseño experimental con un total de 2 corridas y 6 probetas fabricadas (Fig. 6.7.5.2a).

Campaña GEO-E3

El diseño del experimento desarrollado en esta etapa tiene como objetivo analizar el comportamiento de la Arcilla Tipo C bajo la acción de diferente proporción de activador alcalino a base de KOH con concentración molar de 10M y 14M. Se mantienen el resto de factores constantes tal como se muestra en la Tabla de la Fig. 6.7.5.3 con un total de 2 corridas y 6 probetas fabricadas (Fig. 6.7.5.3a).

Campaña GEO-E4

El diseño del experimento desarrollado en esta etapa tiene como objetivo analizar el comportamiento de la Arcilla Tipo C bajo la acción de diferente proporción de activador alcalino a

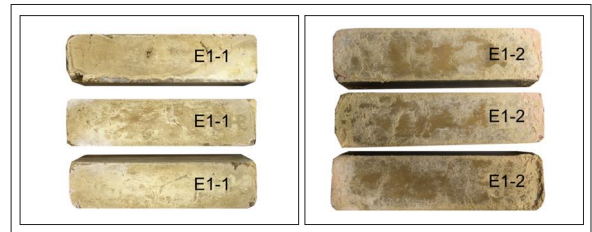


Fig. 6.7.5.1a Probetas de ensayo GEO-E1.

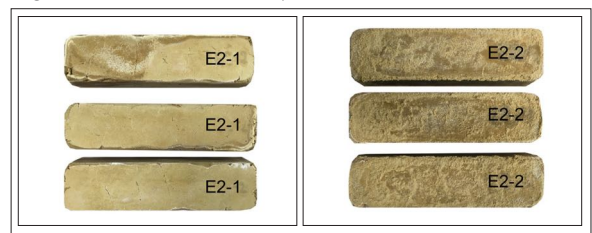


Fig. 6.7.5.2a Probetas de ensayo GEO-E2.

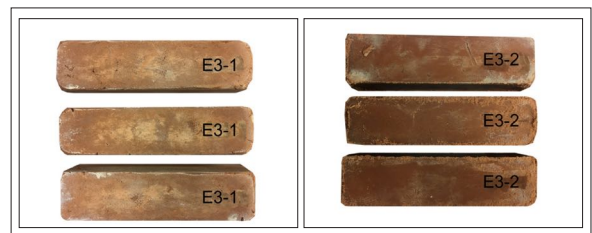


Fig. 6.7.5.3a Probetas de ensayo GEO-E3.



Fig. 6.7.5.4a Probetas de ensayo GEO-E4.



Fig. 6.7.5.5a Probetas de ensayo GEO-E5.

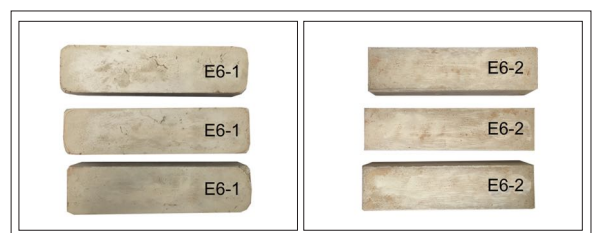


Fig. 6.7.5.6a Probetas de ensayo GEO-E6.

base de KOH con concentración molar de 10M y 14M y silicato de sodio. Se mantienen el resto de factores constantes. En la Tabla de la Figura 6.7.5.4 se expone el diseño experimental con un total de 2 corridas y 6 probetas fabricadas (Fig. 6.7.5.4a).

Campaña GEO-E5

El diseño del experimento desarrollado en esta etapa tiene como objetivo analizar el comportamiento de la Arcilla Tipo D bajo la acción de diferente proporción de activador alcalino a base de KOH con concentración molar de 10M y 14M. Se mantienen el resto de factores constantes tal como se muestra en la Tabla de la Fig. 6.7.5.5

con un total de 2 corridas y 6 probetas fabricadas (Fig. 6.7.5.5a).

Campaña Geo E6

El diseño del experimento desarrollado en esta etapa tiene como objetivo analizar el comportamiento de la Arcilla Tipo D bajo la acción de diferente proporción de activador alcalino a base de KOH con concentración molar de 10M y 14M y silicato de sodio. Se mantienen el resto de factores constantes. En la Tabla de la Figura 6.7.5.6 se expone el diseño experimental con un total de 2 corridas y 6 probetas fabricadas (Fig. 6.7.5.6a).

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-E1								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico		Horas
		Arcilla Tipo B	Arena sílicea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATB	A	RA	KM	°C	H	
ATB-A1-RA0.3-KM10-CT80-H24	GEO-E1 01	1,00	1,00	0,30	10	80	24	
ATB-A1-RA0.3-KM14-CT80-H24	GEO-E1 02	1,00	1,00	0,30	14	80	24	

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-E2									
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico		Horas
		Arcilla Tipo B	Arena sílicea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATB	A	RA	KM	RB	°C	H	
ATB-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-E2 01	1,00	1,00	0,30	10	0,09	80	24	
ATB-A1-RA0,3-KM14-RB0,09-CT80-H24	GEO-E2 02	1,00	1,00	0,30	14	0,11	80	24	

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-E3								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico		Horas
		Arcilla Tipo C	Arena sílicea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATC	A	RA	KM	°C	H	
ATC-A1-RA0.3-KM10-CT80-H24	GEO-E3 01	1,00	1,00	0,30	10	80	24	
ATC-A1-RA0.3-KM14-CT80-H24	GEO-E3 02	1,00	1,00	0,30	14	80	24	

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-E4									
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico		Horas
		Arcilla Tipo C	Arena sílicea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATC	A	RA	KM	RB	°C	H	
ATC-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-E4 01	1,00	1,00	0,30	10	0,09	80	24	
ATC-A1-RA0,3-KM14-RB0,09-CT80-H24	GEO-E4 02	1,00	1,00	0,30	14	0,11	80	24	

Fig. 6.7.5.1, Fig. 6.7.5.2, Fig. 6.7.5.3, Fig. 6.7.5.4. Cuadro de materiales utilizados en la campaña GEO-E1, GEO-E2, GEO-E3 y GEO-E4 respectivamente. La Arcilla Tipo B tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 3,48. La Arcilla Tipo C tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 3,19. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 30°C durante 14 días antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-E5							
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico	
		Arcilla Tipo D	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATD	A	RA	KM	°C	Horas
ATD-A1-RA0.3-KM10-CT80-H24	GEO-E5 01	1,00	1,00	0,30	10	80	24
ATD-A1-RA0.3-KM14-CT80-H24	GEO-E5 02	1,00	1,00	0,30	14	80	24

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-E6								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo D	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (KOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATD	A	RA	KM	RB	°C	Horas
ATD-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-E6 01	1,00	1,00	0,30	10	0,09	80	24
ATD-A1-RA0,3-KM14-RB0,09-CT80-H24	GEO-E6 02	1,00	1,00	0,30	14	0,11	80	24

Fig. 6.7.5.5, Fig. 6.7.5.6 Cuadro de materiales utilizados en la campaña GEO-E5, GEO-E6 respectivamente. La Arcilla Tipo D tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 1,82. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 30°C durante 14 días antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.

3.6.6 - Campaña experimental GEO-FP

El objetivo de esta campaña fue fabricar bloques para realizar diferentes tipos de análisis de caracterización del material.

Campaña GEO-FP (A)

Esta etapa tuvo como objetivo la elaboración de probetas para la realización de análisis complementarios de caracterización del material. Se utilizó: 1 Arcilla Tipo A, 1 arena, 0,3 agua con concentración molar de 10M (NaOH), con exposición a 80°C durante 24 horas. En la Tabla

de la Figura 6.7.6.1 se presenta la tabla de dosificación con un total de 12 probetas fabricadas (Fig. 6.7.6.1a).

Campaña GEO-FP (B)

En esta etapa, a diferencia que la anterior, se utiliza silicato de sodio. Se utilizó: 1 Arcilla Tipo A, 1 arena, 0,3 agua con concentración molar de 10M (NaOH), 0,08 silicato de sodio, con exposición a 80°C durante 24 horas. Partiendo de esto, en la Tabla de la Figura 6.7.6.2 se presenta la tabla de dosificación con un total de 12 probetas fabricadas (Fig. 6.7.6.2a).

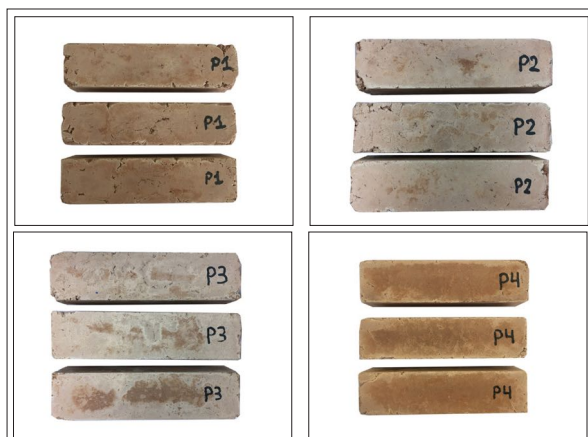


Fig. 6.7.6.1a Probetas de ensayo GEO-FP (A).

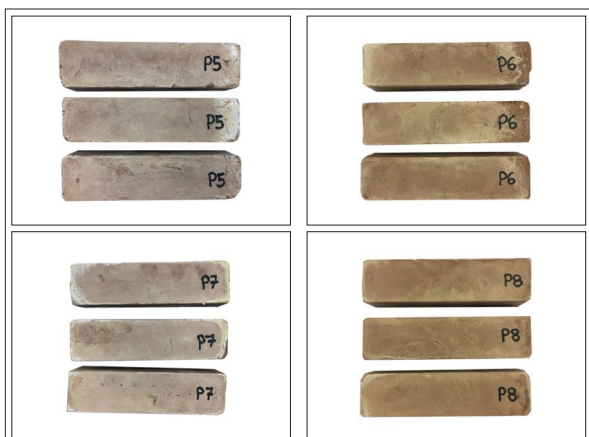


Fig. 6.7.6.2a Probetas de ensayo GEO-FP (B).

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-FP (A)								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico		
		Arcilla Tipo A	Arena sílicea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATA	A	RA	NM	°C	Horas	
ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP 01	1,00	1,00	0,30	10	80	24	
ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP 02	1,00	1,00	0,30	10	80	24	
ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP 03	1,00	1,00	0,30	10	80	24	
ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP 04	1,00	1,00	0,30	10	80	24	

Campaña de ensayos - ENSAYO GEO-FP (B)								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo D	Arena sílicea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATD	A	RA	NM	RB	°C	Horas
ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,8-CT80-H24	GEO-FP 05	1,00	1,00	0,30	10	0,08	80	24
ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,8-CT80-H24	GEO-FP 06	1,00	1,00	0,30	10	0,08	80	24
ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,8-CT80-H24	GEO-FP 07	1,00	1,00	0,30	10	0,08	80	24
ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,8-CT80-H24	GEO-FP 08	1,00	1,00	0,30	10	0,08	80	24

Fig. 6.7.6.1 y Fig. 6.7.2 Cuadro de materiales utilizados en la campaña GEO-FP (A) y GEO-FP (B). La Arcilla Tipo A tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 30°C durante 14 días antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.

3.6.7 Pruebas piloto

Se realizaron una serie de pruebas piloto con la arcilla Tipo A (que guarda una relación SiO₂/Al₂O₃ igual a 2,61). El objetivo principal fue observar el comportamiento de los materiales precursores ante diferentes mezclas, disminuir el nivel de incertidumbre, observar la trabajabilidad del material y finalmente, analizar la influencia de las variables en comparación a la resistencia a compresión obtenida del material compuesto.

En esta etapa se realizaron 17 experimentos con un total de 83 mezclas y 249 probetas fabricadas. De estos experimentos, en los ensayos P01 y P02 se analizaron diferentes proporciones arena-arcilla bajo la acción de un activador alcalino a base de NaOH (con concentración molar 1M); en el ensayo P03 se analizaron diferentes proporciones arena-arcilla bajo la acción de un activador alcalino a base de NaOH (con concentración molar 10M); en el ensayo P04 se probaron diferentes proporciones de activador alcalino a base de NaOH (con concentración molar 10M) con la adición de Na₂SiO₃; en los ensayos P05 y P06 se analizaron diferentes condiciones de curado; en el ensayo P07 se hicieron pruebas con diferentes proporciones arena-arcilla bajo la acción de un activador alcalino a base de NaOH

(con concentración molar 10M) y Na₂SiO₃.

Dentro de la campaña preliminar también se realizaron pruebas piloto con otras variables con la intención de observar la repercusión en la resistencia a compresión simple del material, así, en el ensayo P00X1 y P00X2 se probaron fuentes de aluminosilicatos alternativas y diferentes proporciones de activador alcalino a base de NaOH con concentración molar variable; en el ensayo P00X3 y P00X4 se probó la adición de arcilla térmicamente "activada" a 750°C por cuatro horas y proporciones variables de arcilla-arena; en el ensayo P00X5 se estudió el comportamiento de probetas sin activador alcalino; en el ensayo P00X6 se probaron diferentes "estabilizantes adicionales" (plastificantes de suministro comercial); en el ensayo P00X7, P00X8 y P00X9 se probaron proporciones variables de arcilla-arena con diferente tamaño de partícula de arena (1mm Ø, 3mm Ø y 3-6mm Ø respectivamente); en el ensayo P00X10 se probaron proporciones variables de activador alcalino con aditivos adicionales (plastificantes de suministro comercial).

A continuación se detallan las campañas experimentales correspondientes.

Campaña experimental P01

Campaña de ensayos preliminares - ENSAYO P01							
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	°C CT	Horas H
ATA-A0,25-RA0,24-NM1-CT80-H24	P01-01	1,00	0,25	0,24	1	80	24
ATA-A0,5-RA0,24-NM1-CT80-H24	P01-02	1,00	0,50	0,24	1	80	24
ATA-A1-RA0,24-NM1-CT80-H24	P01-03	1,00	1,00	0,24	1	80	24
ATA-A1,5-RA0,24-NM1-CT80-H24	P01-04	1,00	1,50	0,24	1	80	24

Campaña experimental P02

Campaña de ensayos preliminares - ENSAYO P02							
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	°C CT	Horas H
ATA-A0,25-RA0,3-NM1-CT80-H24	P02-01	1,00	0,25	0,30	1	80	24
ATA-A0,5-RA0,36-NM1-CT80-H24	P02-02	1,00	0,50	0,36	1	80	24
ATA-A1-RA0,52-NM1-CT80-H24	P02-03	1,00	1,00	0,52	1	80	24
ATA-A1,5-RA0,71-NM1-CT80-H24	P02-04	1,00	1,50	0,71	1	80	24

Campaña experimental P03

Campaña de ensayos preliminares - ENSAYO P03							
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	°C CT	Horas H
ATA-A0,5-RA0,27-NM10-CT100-H24	P03-01	1,00	0,50	0,27	10	100	24
ATA-A1-RA0,36-NM10-CT100-H24	P03-02	1,00	1,00	0,36	10	100	24
ATA-A1,5-RA0,45-NM10-CT100-H24	P03-03	1,00	1,50	0,45	10	100	24

Campaña experimental P04

Campaña de ensayos preliminares - ENSAYO P04								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	RB	°C CT	Horas H
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H96	P04-01	1,00	1,00	0,30	10	0,08	100	96
ATA-A1-RA0,41-NM10-RB0,11-CT100-H96	P04-02	1,00	1,00	0,41	10	0,11	100	96
ATA-A1-RA0,48-NM10-RB0,13-CT100-H96	P04-03	1,00	1,00	0,48	10	0,13	100	96

La Arcilla Tipo A tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 23°C durante 21 días (P01, P02); 18 días (P03); 14 días (P04) antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE GEOPOLÍMEROS DE ARCILLAS EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA
DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Campaña experimental P05

Campaña de ensayos preliminares - ENSAYO P05							
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	°C CT	Horas H
ATA-A1-RA0,36-NM10	P05-01	1,00	1,00	0,36	10	-	-
ATA-A1-RA0,36-NM10-CT110-H4	P05-02	1,00	1,00	0,36	10	110	4
ATA-A1-RA0,36-NM10-CT110-H7	P05-03	1,00	1,00	0,36	10	110	7
ATA-A1-RA0,36-NM10-CT110-H24	P05-04	1,00	1,00	0,36	10	110	24

Campaña experimental P06

Campaña de ensayos preliminares - ENSAYO P06								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	RB	°C CT	Horas H
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08	P06-01	1,00	1,00	0,30	10	0,08	-	-
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H2	P06-02	1,00	1,00	0,30	10	0,08	110	2
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H7	P06-03	1,00	1,00	0,30	10	0,08	110	7
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H24	P06-04	1,00	1,00	0,30	10	0,08	110	24

Campaña experimental P07

Campaña de ensayos preliminares - ENSAYO P07								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	RB	°C CT	Horas H
ATA-A0,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-01	1,00	0,75	0,30	10	0,08	100	4
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-02	1,00	1,00	0,30	10	0,08	100	4
ATA-A1,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-03	1,00	1,25	0,30	10	0,08	100	4
ATA-A1,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-04	1,00	1,50	0,30	10	0,08	100	4

Campaña experimental P00X1

Campaña de ensayos preliminares - ENSAYO P00X1								
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico		
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATA	A	RA	NM	°C CT	Horas H	
ATA-A0,5-RA0,36	P00X1-01	1,00	0,50	0,36	0	-	-	
ATA-A0,5-RA0,20-NT20-CT80-H6	P00X1-02	1,00	0,50	0,20	20	80	6	
ATA-A0,5-RA0,30-NT13-CT80-H6	P00X1-03	1,00	0,50	0,30	13	80	6	
ATA-A0,5-RA0,36-NT36-CT80-H6	P00X1-04	1,00	0,50	0,36	11	80	6	

La Arcilla Tipo A tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 30°C durante 14 días (P05, P06, P07) y 28 días (P00X1) antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.

Campaña experimental P00X2

Campaña de ensayos preliminares - ENSAYO P00X2							
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	°C CT	Horas H
ATA-A0,5-RA0,37-NM10-CT100-H24	P00X2-01	1,00	0,50	0,37	10	100	24
ATA-A1-RA0,49-NT10-CT100-H24	P00X2-02	1,00	1,00	0,49	10	100	24
ATA-A2-RA0,73-NT10-CT100-H24	P00X2-03	1,00	2,00	0,73	10	100	24

Campaña experimental P00X3

Campaña de ensayos preliminares - P00X3 (arcilla térmicamente activada)									
Nomenclatura	Código	Áridos			Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arcilla Activada	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	AC	A	RA	NM	RB	°C CT	Horas H
AC1-A1-RA0,41-NM10-RB0,11-CT100-H24	P00X3-01	0,00	1,00	1,00	0,41	10	0,11	100	24
ATA0,5-AC1-A1-RA0,27-NM10-RB0,11-CT100-H24	P00X3-02	0,50	1,00	1,00	0,27	10	0,11	100	24
ATA0,67-AC1-A1-RA0,24-NM10-RB0,11-CT100-H24	P00X3-03	0,67	1,00	0,33	0,24	10	0,11	100	24

Campaña experimental P00X4

Campaña de ensayos preliminares - P00X4 (arcilla térmicamente activada)									
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico		
		Arcilla Activada	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición	
		AC	A	RA	NM	RB	°C CT	Horas H	
AC1-A2-RA0,61-NM10-RB0,17-CT100-H4	P00X4-01	1,00	2,00	0,61	10	0,17	100	4	
AC1-A3-RA0,81-NM10-RB0,23-CT100-H4	P00X4-02	1,00	3,00	0,81	10	0,23	100	4	
AC1-A6,5-RA1,53-NM10-RB0,43-CT100-H4	P00X4-03	1,00	6,50	1,53	10	0,43	100	4	

Campaña experimental P00X5

Campaña de ensayos preliminares - ENSAYO P00X5							
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	°C CT	Horas H
ATA-A1-RA0,50	P00X5-01	1,00	1,00	0,50	0	-	-
ATA-A1-RA0,50-CT100-H4	P00X5-02	1,00	1,00	0,50	0	100	4
ATA-A1-RA0,50-CT100-H24	P00X5-03	1,00	1,00	0,50	0	100	24
ATA-A1-RA0,50-CT100-H24	P00X5-04	1,00	1,00	0,50	0	100	24
ATA-A1-RA0,37-CT100-H24	P00X5-05	1,00	1,00	0,37	0	100	24

La Arcilla Tipo A tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 23°C durante 14 días (P00X2 y P00X5) y 11 días (P00X3 y P00X4) antes de realizar los ensayos respectivos. Detalles en el Anexo 6.7.1.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE GEOPOLÍMEROS DE ARCILLAS EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA
DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Campana experimental P00X6 Campana de ensayos preliminares - ENSAYO P00X6 - Prueba de aditivos									
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Aditivo C	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Diferentes	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	RB	RC	°C CT	Horas H
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT80-H48	P00X6-01	1,00	1,00	0,30	10	0,08	0,00	80	48
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC ₁ 0,02-CT80-H48	P00X6-02	1,00	1,00	0,30	10	0,08	0,02	80	48
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC ₂ 0,02-CT80-H48	P00X6-03	1,00	1,00	0,30	10	0,08	0,02	80	48
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC ₃ 0,01-CT80-H48	P00X6-04	1,00	1,00	0,30	10	0,08	0,01	80	48

Campana experimental P00X7 Campana de ensayos preliminares - ENSAYO P00X7									
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico		
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATA	A ₁	RA	NM	RB	°C CT	Horas H	
ATA-A ₁ 0,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X7-01	1,00	0,75	0,30	10	0,08	100	4	
ATA-A ₁ 1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X7-02	1,00	1,00	0,30	10	0,08	100	4	
ATA-A ₁ 1,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X7-03	1,00	1,25	0,30	10	0,08	100	4	
ATA-A ₁ 1,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X7-04	1,00	1,50	0,30	10	0,08	100	4	

Campana experimental P00X8 Campana de ensayos preliminares - ENSAYO P00X8									
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico		
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATA	A ₂	RA	NM	RB	°C CT	Horas H	
ATA-A ₂ 0,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X8-01	1,00	0,75	0,30	10	0,08	100	4	
ATA-A ₂ 1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X8-02	1,00	1,00	0,30	10	0,08	100	4	
ATA-A ₂ 1,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X8-03	1,00	1,25	0,30	10	0,08	100	4	
ATA-A ₂ 1,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X8-04	1,00	1,50	0,30	10	0,08	100	4	

Campana experimental P00X9 Campana de ensayos preliminares - ENSAYO P00X9									
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Curado Térmico		
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Temperatura	Tiempo de exposición	
		ATA	A ₃	RA	NM	RB	°C CT	Horas H	
ATA-A ₃ 0,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X9-01	1,00	0,75	0,30	10	0,08	100	4	
ATA-A ₃ 1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X9-02	1,00	1,00	0,30	10	0,08	100	4	
ATA-A ₃ 1,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X9-03	1,00	1,25	0,30	10	0,08	100	4	
ATA-A ₃ 1,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X9-04	1,00	1,50	0,30	10	0,08	100	4	

Campana experimental P00X10 Campana de ensayos preliminares - ENSAYO P00X10 - Pruebas aleatorias									
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Aditivo C	Curado Térmico	
		Arcilla Tipo A	Arena silícea	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH)	Na ₂ SiO ₃	Diferentes	Temperatura	Tiempo de exposición
		ATA	A	RA	NM	RB	RC	°C CT	Horas H
ATA-A1-RA0,17-NM10-RB0,05-RC ₀ 0,24-CT110-H24	P00X10-01	1,00	1,00	0,17	10	0,05	0,24	110	24
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC ₀ 0,10	P00X10-02	1,00	1,00	0,30	10	0,08	0,10	-	-
ATA-A1,2-RA0,33-NM10-RB0,09-RC ₀ 0,01-CT110-H72	P00X10-03	1,00	1,20	0,33	10	0,09	0,01	110	72
ATA-A1-RA0,29-NM10-RB0,08-RC ₀ 0,01-CT110-H72	P00X10-04	1,00	1,00	0,29	10	0,08	0,01	110	72
ATA-A1-RA0,29-NM10-RB0,08-RC ₀ 0,01-CT110-H72	P00X10-05	1,00	1,00	0,29	10	0,08	0,01	110	72
ATA-A1-RA0,36-NM10-RB0,10-RC ₀ 0,10	P00X10-06	1,00	1,00	0,36	10	0,10	0,10	-	-
ATA-A1-RA0,36-NM10-RB0,10-RC ₀ 0,10	P00X10-07	1,00	1,00	0,36	10	0,10	0,10	-	-

La Arcilla Tipo A tiene un ratio SiO₂/Al₂O₃ igual a 2,62. Todas las muestras fueron mezcladas a 285rpm durante 300 segundos y curadas finalmente en condiciones de laboratorio a 30°C durante 14 días (21 días P00X6). Detalles en el Anexo 6.7.1. *Nota : P00X6-01 no contiene plastificante. P00X6-02 lleva Sikament FF (RC₁); P00X6-03 lleva Sikament 1 65 ES FF (RC₂); P00X6-04 lleva ViscoCrete 1 25 FF (RC₃). La arena utilizada en el ensayo P00X7 tiene un diámetro de 1mm (A₁), en el ensayo P00X8 un diámetro de 3mm (A₂), y en el ensayo P00X9 tiene un diámetro entre 3mm (A₂) y 6mm (A₃). * Nota: P00X10-01 con agua marina (RC₀); P00X10-02 con Cal viva (RC₄); P00X10-03, P00X10-04 y P00X10-05 con Hexametáfosfato de sodio (RC₂); P00X10-06 con Cal viva (RC₄); P00X10-07 con Cal viva (RC₄).

RESULTADOS

Los resultados de la campaña experimental se dividen en cuatro partes. La primera parte (apartado 3.7) contiene los datos correspondientes a los resultados de los ensayos de resistencia a flexión y compresión ordenados por campañas experimentales.

En la segunda parte (apartado 3.8) se analizan los resultados y la influencia de los materiales precursores y los procesos de fabricación en función de la resistencia a compresión. Es decir, la resistencia a compresión es considerada como la variable de respuesta para determinar el rol del resto de factores que intervienen en la composición de los geo-polímeros de arcilla Tipo A: arena, activador alcalino ($H_2O + NaOH$ o KOH), silicato de sodio (si es el caso), temperatura y tiempo de exposición. Esta parte contiene un análisis factorial de dos niveles basado en el diseño de experimentos (DOE) de la campaña GEO-A y GEO-B, y un análisis comparativo de la influencia de las variables, por separado, en el comportamiento mecánico de los geo-polímeros de arcilla. Esta comparación permite identificar los valores óptimos de las variables en función de la resistencia a compresión.

La tercera parte (apartado 3.9) contiene un análisis comparativo del comportamiento mecánico (resistencia compresión) de geo-polímeros a base de diferentes tipos de arcilla (Tipo A, Tipo B, Tipo C y Tipo D) con una formulación y procedimiento de fabricación común.

La cuarta parte (apartado 3.10) contiene análisis complementarios de caracterización de geo-polímeros de arcilla Tipo A: Difracción de rayos X (DRX); Análisis termogravimétrico (ATG); Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM); Porosimetría de mercurio; Porosidad y densidad; Determinación de la absorción de agua por capilaridad; Permeabilidad al vapor de agua; Módulo de elasticidad dinámico (MOE); Determinación de durabilidad; Lixiviación; Comportamiento térmico; y Comportamiento ambiental. Finalmente el apartado 3.11 expone

los resultados obtenidos del análisis de impacto ambiental en relación a las variables que intervienen y a la resistencia a compresión obtenida.

3.7 RESISTENCIA MECÁNICA

A continuación se exponen únicamente los datos de los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y flexión de cada campaña experimental. En los apartados 3.8; 3.9; 3.10 y 3.11 se hace el análisis de estos resultados con el objetivo de determinar el rol y la repercusión de los factores implicados.

En los ensayos mecánicos, los datos de dispersión de resultados evidenciaron la fiabilidad de las pruebas en la mayoría de muestras. Pese a ello, existen pocos casos en los que, por motivos asociados a los procesos de fabricación, mezcla y moldeo manual, se encuentran muestras que presentan fluctuaciones importantes con una dosificación común. Como criterio de partida, se ha considerado que los resultados confiables han de ser aquellos de las muestras que, en los ensayos de resistencia a compresión (con seis muestras por mezcla), están dentro de un rango de dispersión del 15% y para los ensayos de resistencia a flexión (con tres muestras por mezcla) están dentro de un 20%. Aquellas muestras que superan este límite se señalan con color azul.

Los resultados del comportamiento mecánico varían considerablemente dependiendo de los factores inherentes a la dosificación y proceso de fabricación utilizado en cada muestra. Esto, que se corrobora en las tablas de códigos y nomenclaturas* correspondiente a cada campaña experimental, evidencia la sinergia entre todos los factores que intervienen y la complejidad que

* Nomenclaturas: Donde **AT** es el tipo de arcilla (A,B,C,D); **A** es la cantidad de arena (A_1 , A_2 y A_3 con diámetro de partícula de $250\mu m$, $1mm$, $3mm$ y $3-6mm$ respectivamente) en relación a la arcilla en peso; **RA** es la cantidad de agua que interviene en la solución alcalina en relación a la arcilla en peso; **NM** es la concentración molar de la solución ($NaOH$); **KM** es la concentración molar de la solución (KOH); **RB** es la cantidad de Na_2OH_3 en relación a la arcilla en peso; **RC** es la cantidad (en relación a la arcilla en peso) y tipo de aditivo en donde RC_0 es agua marina, RC_1 es Sikament FF, RC_2 Sikament 165 ES FF, RC_3 es ViscoCrete 125 FF, RC_4 es Cal viva, RC_5 es Hexametáfosfato de sodio y RC_6 es Cal viva (F plus); **CT** es la temperatura a la que es expuesta la muestra; y **H** es el tiempo de exposición a tiempo de temperatura.

representa la determinación del rol de las variables involucradas: tarea que se aborda posteriormente (apartado 3.8 y apartado 3.9).

3.7.1 Resistencia a la compresión y flexión: Campaña experimental GEO-A

Se ensayaron tres probetas de cada muestra a flexión y seis a compresión. Los resultados mostraron que la resistencia a flexión que alcanzaron las probetas de la campaña experimental GEO-A oscilaron entre 1,2 y 5,4MPa y la resistencia a compresión osciló entre 2,9 y 11,8MPa (Fig. 6.9.1.1 y Fig. 6.9.1.2). De las 32 muestras 5 obtuvieron resistencias mayores a 8MPa y tan solo dos (GEO-A26 y GEO-A29) obtuvieron resistencias mayores a 10MPa. La muestra GEO-A29 tuvo el mayor desempeño mecánico de esta campaña experimental con 5,4MPa de resistencia a flexión y 11,8MPa de resistencia a compresión.

La correlación entre la resistencia a compresión

Tabla de códigos y nomenclaturas de referencia de mezclas	
Código	Nomenclatura descriptiva
GEO-A01	ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT80-H2
GEO-A02	ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT80-H2
GEO-A03	ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT80-H2
GEO-A04	ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT80-H2
GEO-A05	ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT80-H2
GEO-A06	ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT80-H2
GEO-A07	ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT80-H2
GEO-A08	ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT80-H2
GEO-A09	ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT120-H2
GEO-A10	ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT120-H2
GEO-A11	ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT120-H2
GEO-A12	ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT120-H2
GEO-A13	ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT120-H2
GEO-A14	ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT120-H2
GEO-A15	ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT120-H2
GEO-A16	ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT120-H2
GEO-A17	ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT80-H4
GEO-A18	ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT80-H4
GEO-A19	ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT80-H4
GEO-A20	ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT80-H4
GEO-A21	ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT80-H4
GEO-A22	ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT80-H4
GEO-A23	ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT80-H4
GEO-A24	ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT80-H4
GEO-A25	ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT120-H4
GEO-A26	ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT120-H4
GEO-A27	ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT120-H4
GEO-A28	ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT120-H4
GEO-A29	ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT120-H4
GEO-A30	ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT120-H4
GEO-A31	ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT120-H4
GEO-A32	ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT120-H4

Fig. 6.9.1.1 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-A

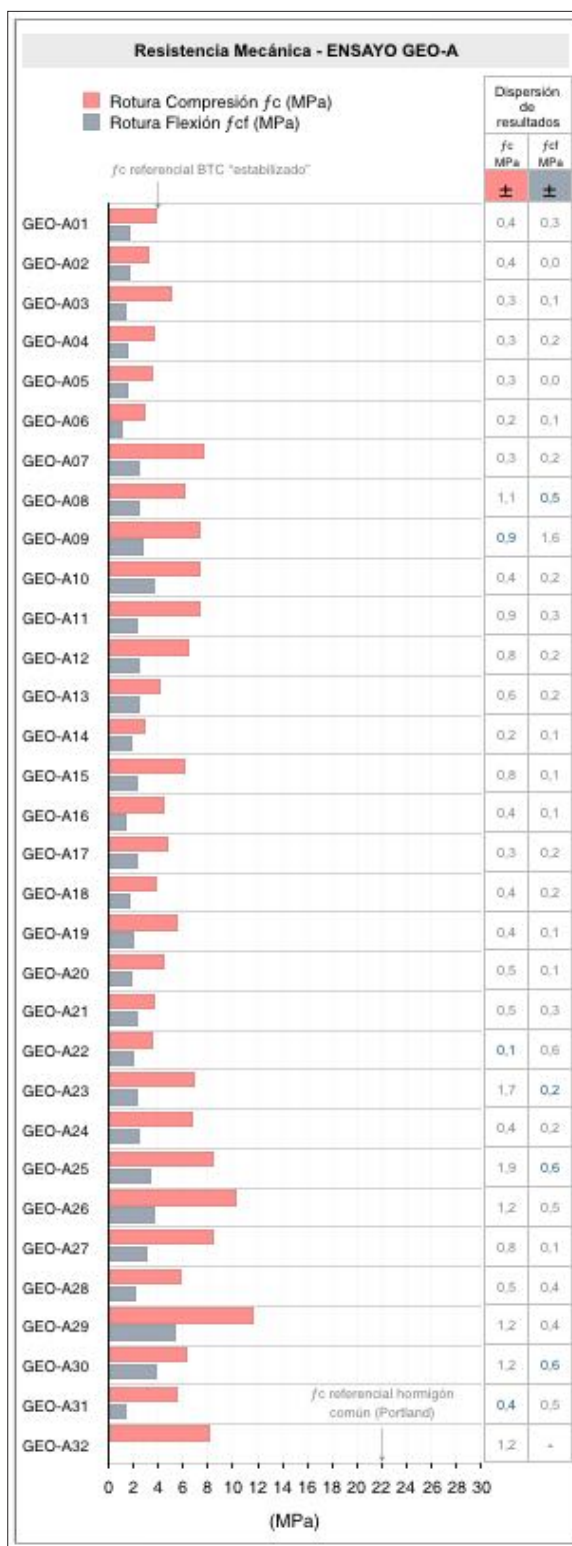


Fig. 6.9.1.2 Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-A. Los valores resaltados con azul muestran, en el caso de f_c una dispersión de resultados mayor al 15% y en el caso de f_{cf} mayor al 20%.

(f_c) y la resistencia a flexión (f_{cf}) de las muestras, no ha sido analizada en este estudio. Los detalles del ensayo a compresión y flexión de la campaña experimental GEO-A se exponen en el Anexo 6.9.1. En el apartado 3.8.1 se desarrolla un estudio detallado de la influencia de las variables en la resistencia a compresión mediante un análisis factorial.

3.7.2 Resistencia a la compresión: Campaña experimental GEO-B

Las probetas GEO-B fueron únicamente sometidas a ensayos de resistencia a compresión debido a problemas técnicos. Se ensayaron a compresión seis probetas de cada muestra. Los resultados de la resistencia a compresión que alcanzaron las probetas de la campaña experimental GEO-B oscilaron entre 15,1 y 29,3MPa (Fig. 6.9.2.1 y Fig. 6.9.2.2). Todas las muestras obtuvieron resistencias mayores a 10MPa y tres de las ocho (GEO-B01, GEO-B03, GEO-B06) obtuvieron resistencias mayores a 20MPa. Las muestras GEO-B01 y GEO-B03 tuvieron resistencias a compresión sobresalientes con valores de 25,7 y 29,3Mpa respectivamente.

Los detalles del ensayo a compresión y la dispersión de resultados de la campaña experimental GEO-B se exponen en el Anexo 6.9.2. En el apartado 3.8.2 se desarrolla un estudio detallado de la influencia de las variables en la resistencia a compresión mediante un análisis factorial.

Tabla de códigos y nomenclaturas de referencia de mezclas	
Código	Nomenclatura descriptiva
GEO-B01	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24
GEO-B02	ATA-A1-RA0,3-NM5-CT80-H24
GEO-B03	ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24
GEO-B04	ATA-A1-RA0,3-KM5-CT80-H24
GEO-B05	ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,08-CT80-H24
GEO-B06	ATA-A1-RA0,3-NM5-RB0,07-CT80-H24
GEO-B07	ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24
GEO-B08	ATA-A1-RA0,3-KM5-RB0,08-CT80-H24

Fig. 6.9.2.1 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-B

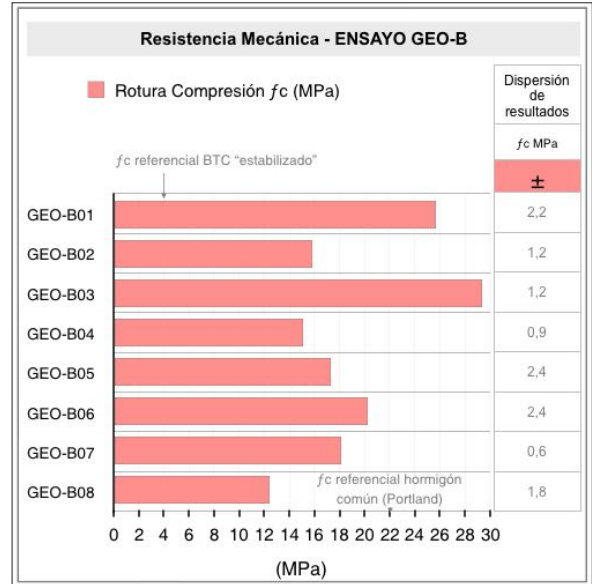


Fig. 6.9.2.2 Resistencia a compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-B. Los valores resaltados con azul muestran, en el caso de f_c una dispersión de resultados mayor al 15%.

3.7.3 Resistencia a la compresión y flexión: Campaña experimental GEO-C

Las probetas GEO-C fueron sometidas a ensayos de resistencia a la flexión y compresión.

Se ensayaron tres probetas de cada muestra a flexión y seis a compresión. Los resultados mostraron que la resistencia a flexión que alcanzaron las probetas de la campaña experimental GEO-C oscilaron entre 1,7 y 6,2MPa y la resistencia a compresión osciló entre 3,6 y 23,3MPa. La campaña experimental GEO-C se dividió en seis partes (C1, C2, C3, C4, C5 y C6) y los resultados se exponen en este orden (Fig. 6.9.3.1 y Fig. 6.9.3.2). Los detalles del ensayo mecánico de la campaña experimental GEO-C y la dispersión de resultados se exponen en el Anexo 6.9.3.

3.7.4 Resistencia a la compresión y flexión: Campaña experimental GEO-D

Las probetas GEO-D fueron sometidas a ensayos de resistencia a flexión y compresión. Se ensayaron tres probetas de cada muestra a flexión y seis a compresión. Los resultados de la resistencia a

Código	Nomenclatura descriptiva
GEO-C1 01	ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24
GEO-C1 02	ATA-A1-RA0,34-KM10-CT80-H24
GEO-C1 03	ATA-A1-RA0,38-KM10-CT80-H24
GEO-C1 04	ATA-A1-RA0,42-KM10-CT80-H24
GEO-C2 01	ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24
GEO-C2 02	ATA-A1-RA0,34-KM10-RB0,11-CT80-H24
GEO-C2 03	ATA-A1-RA0,38-KM10-RB0,12-CT80-H24
GEO-C2 04	ATA-A1-RA0,42-KM10-RB0,13-CT80-H24
GEO-C3 01	ATA-A1-RA0,3-KM10
GEO-C3 02	ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H7
GEO-C3 03	ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H14
GEO-C3 04	ATA-A1-RA0,43-KM10-CT80-H24
GEO-C4 01	ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24
GEO-C4 02	ATA-A1-RA0,34-KM10-RB0,11-CT80-H24
GEO-C4 03	ATA-A1-RA0,38-KM10-RB0,12-CT80-H24
GEO-C4 04	ATA-A1-RA0,42-KM10-RB0,13-CT80-H24
GEO-C5 01	ATA-A1-RA0,3-KM8-CT80-H24
GEO-C5 02	ATA-A1-RA0,28-KM10-CT80-H24
GEO-C5 03	ATA-A1-RA0,26-KM12-CT80-H24
GEO-C5 04	ATA-A1-RA0,24-KM14-CT80-H24
GEO-C6 01	ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24
GEO-C6 02	ATA-A1-RA0,34-KM10-RB0,11-CT80-H24
GEO-C6 03	ATA-A1-RA0,38-KM10-RB0,12-CT80-H24
GEO-C6 04	ATA-A1-RA0,42-KM10-RB0,13-CT80-H24

Fig. 6.9.3.1 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-C

flexión que alcanzaron las probetas de la campaña experimental GEO-D oscilaron entre 3,1 y 8,2MPa y la resistencia a compresión osciló entre 10,2 y 22,7MPa.

La campaña experimental GEO-D se dividió en dos partes (D1 y D2) y los resultados se exponen en este orden (Fig. 6.9.4.1 y Fig. 6.9.4.2). Los detalles del ensayo mecánico de la campaña experimental GEO-D y la dispersión de resultados se exponen en el Anexo 6.9.4.

3.7.5 Resistencia a la compresión y flexión: Campaña experimental GEO-E

Las probetas GEO-E fueron sometidas a ensayos de resistencia a flexión y compresión. Se ensayaron tres probetas de cada mezcla a flexión y seis a compresión. Los resultados de la resistencia a flexión que alcanzaron las probetas de la campaña experimental GEO-E oscilaron entre 0,6 y 4MPa y la resistencia a compresión osciló entre 1,4 y 9,7MPa. La campaña experimental GEO-E se dividió en seis partes (E1, E2, E3, E4, E5 y E6) y los resultados se exponen en este orden (Fig. 6.9.5.1 y Fig. 6.9.5.2). Los detalles del ensayo

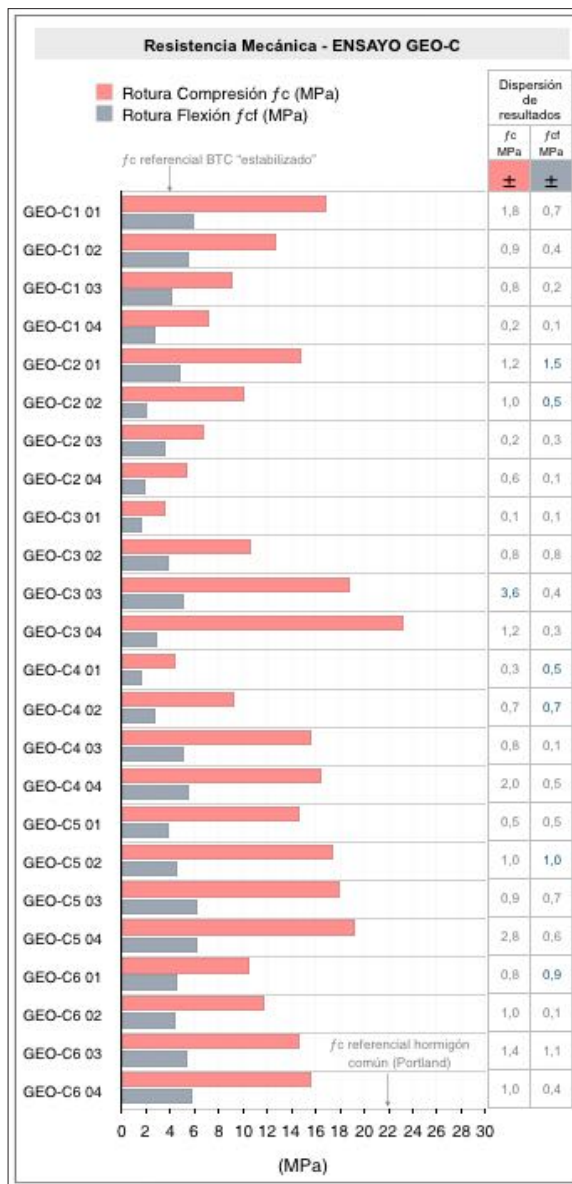


Fig. 6.9.3.2 Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-C. Los valores resaltados con azul muestran, en el caso de f_c una dispersión de resultados mayor al 15% y en el caso de f_{cf} mayor al 20%.

Código	Nomenclatura descriptiva
GEO-D1 01	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC4 0,06-CT80-H24
GEO-D1 02	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC4 0,10-CT80-H24
GEO-D1 03	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC4 0,14-CT80-H24
GEO-D1 04	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC4 0,18-CT80-H24
GEO-D2 01	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC4 0,06
GEO-D2 02	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC4 0,10
GEO-D2 03	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC4 0,14
GEO-D2 04	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC4 0,18

Fig. 6.9.4.1 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-D

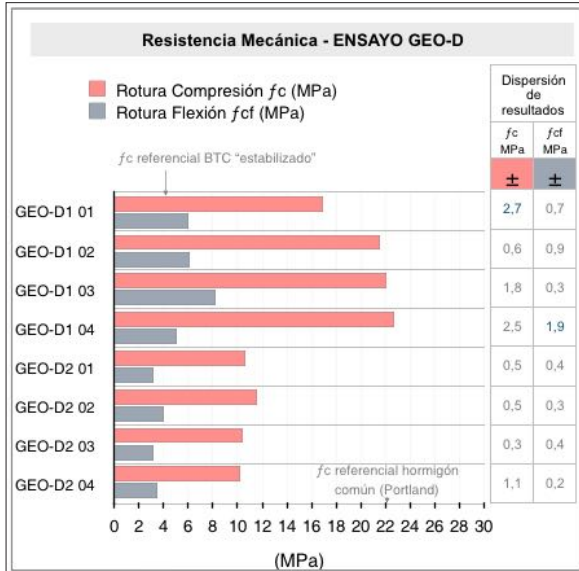


Fig. 6.9.4.2 Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-D. Los valores resaltados con azul muestran, en el caso de f_c una dispersión de resultados mayor al 15% y en el caso de f_{cf} mayor al 20%.

mecánico de la campaña experimental GEO-E y la dispersión de resultados se exponen en el Anexo 6.9.5.

3.7.6 Resistencia a la compresión y flexión: Ensayos complementarios

Este apartado contiene los resultados de los análisis de resistencia a compresión y flexión de ensayos complementarios GEO-FP (Fig. 6.9.6.1 y Fig. 6.9.6.2) y de las pruebas preliminares piloto (P).

Se ensayaron tres probetas de cada muestra a

Código	Nomenclatura descriptiva
GEO-E1 01	ATB-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24
GEO-E1 02	ATB-A1-RA0,3-KM14-CT80-H24
GEO-E2 01	ATB-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24
GEO-E2 02	ATB-A1-RA0,3-KM14-RB0,09-CT80-H24
GEO-E3 01	ATC-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24
GEO-E3 02	ATC-A1-RA0,3-KM14-CT80-H24
GEO-E4 01	ATC-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24
GEO-E4 02	ATC-A1-RA0,3-KM14-RB0,09-CT80-H24
GEO-E5 01	ATD-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24
GEO-E5 02	ATD-A1-RA0,3-KM14-CT80-H24
GEO-E6 01	ATD-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24
GEO-E6 02	ATD-A1-RA0,3-KM14-RB0,09-CT80-H24

Fig. 6.9.5.1 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-E

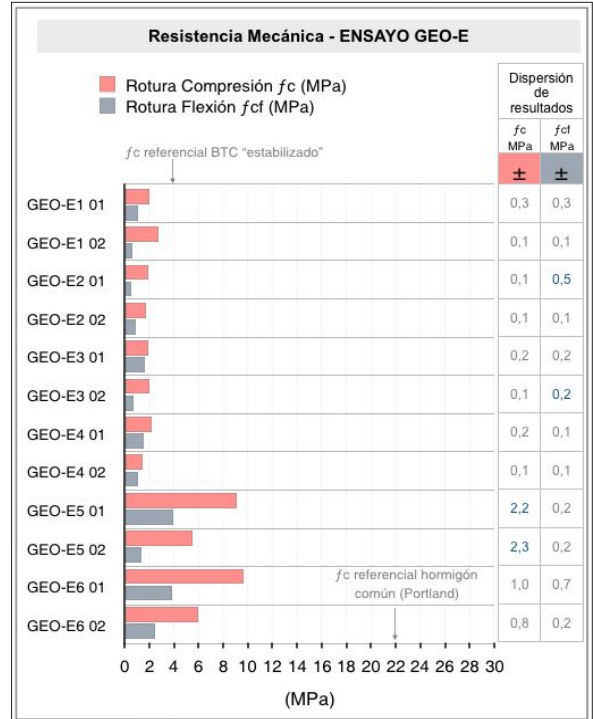


Fig. 6.9.5.2 Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental Geo-E. Los valores resaltados con azul muestran, en el caso de f_c una dispersión de resultados mayor al 15% y en el caso de f_{cf} mayor al 20%.

Código	Nomenclatura descriptiva
GEO-FP 01	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24
GEO-FP 04	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24
GEO-FP 06	ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,8-CT80-H24
GEO-FP 08	ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,8-CT80-H24

Fig. 6.9.6.1 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-FP

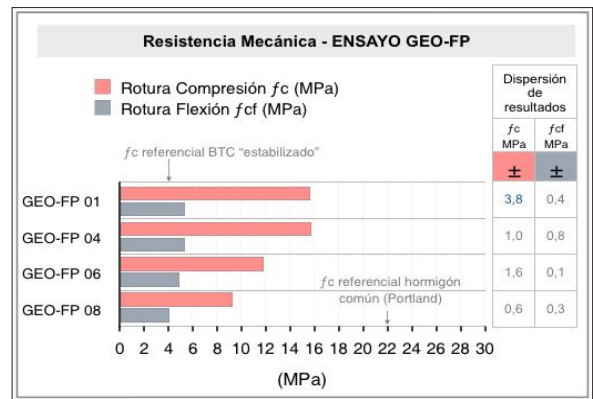


Fig. 6.9.6.2 Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-FP. Los valores resaltados con azul muestran, en el caso de f_c una dispersión de resultados mayor al 15% y en el caso de f_{cf} mayor al 20%.

flexión y seis a compresión. Los resultados mostraron que la resistencia a flexión de las probetas de la campaña experimental GEO-FP oscilaron entre 4,1 y 5,4MPa y la resistencia a compresión osciló entre 9,3 y 15,8MPa (Fig. 6.9.6.1 y Fig. 6.9.6.2).

Los resultados obtenidos de la campaña experimental P (pruebas piloto) se dividieron en P01, P02, P03, P05, P06, P07 (Fig. 6.9.6.3 y Fig. 6.9.6.4), P00X1, P00X2, P00X3, P00X5, P00X6, P00X7, P00X8, P00X9, P00X10 (Fig. 6.9.6.5 y Fig. 6.9.6.6).

Los resultados de la resistencia a compresión de las pruebas P01 a P07 oscilaron entre 0,5 y 29MPa. Los resultados de la resistencia a compresión de las pruebas P00X1 a P00X10 oscilaron entre 1,1 y 35,2MPa.

Los detalles del ensayo mecánico de la campaña experimental GEO-FP, P y la dispersión de resultados se exponen en el Anexo 6.9.6.

Como se observa en las diferentes tablas, la

Código	Nomenclatura descriptiva
P01-01	ATA-A0,25-RA0,24-NM1-CT80-H24
P01-02	ATA-A0,5-RA0,24-NM1-CT80-H24
P01-03	ATA-A1-RA0,24-NM1-CT80-H24
P01-04	ATA-A1,5-RA0,24-NM1-CT80-H24
P02-01	ATA-A0,25-RA0,3-NM1-CT80-H24
P02-02	ATA-A0,5-RA0,36-NM1-CT80-H24
P02-03	ATA-A1-RA0,52-NM1-CT80-H24
P02-04	ATA-A1,5-RA0,71-NM1-CT80-H24
P03-01	ATA-A0,5-RA0,27-NM10-CT100-H24
P03-02	ATA-A1-RA0,36-NM10-CT100-H24
P03-03	ATA-A1,5-RA0,45-NM10-CT100-H24
P04-01	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H96
P04-02	ATA-A1-RA0,41-NM10-RB0,11-CT100-H96
P04-03	ATA-A1-RA0,48-NM10-RB0,13-CT100-H96
P05-01	ATA-A1-RA0,36-NM10
P05-02	ATA-A1-RA0,36-NM10-CT110-H4
P05-03	ATA-A1-RA0,36-NM10-CT110-H7
P05-04	ATA-A1-RA0,36-NM10-CT110-H24
P06-01	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08
P06-02	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H2
P06-03	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H7
P06-04	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H24
P07-01	ATA-A0,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P07-02	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P07-03	ATA-A1,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P07-04	ATA-A1,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4

Fig. 6.9.6.3 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental P

variación en la resistencia a compresión alcanzada por las diferentes muestras de las diferentes campañas experimentales depende de múltiples factores. La sinergia entre las diferentes variables que intervienen y repercuten en las propiedades

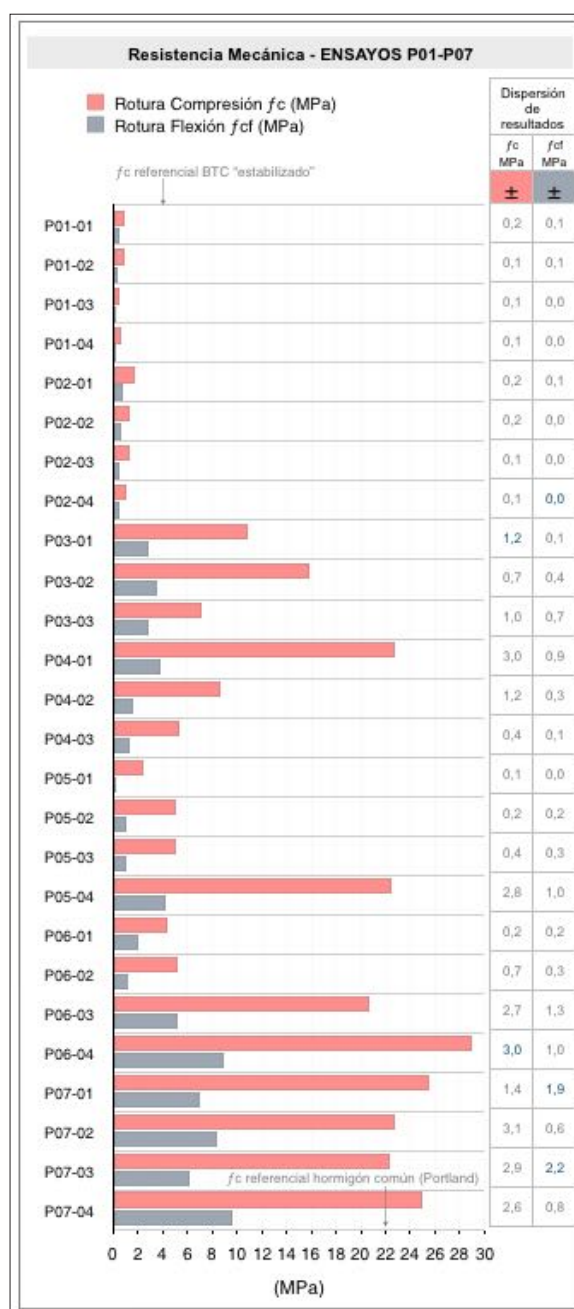


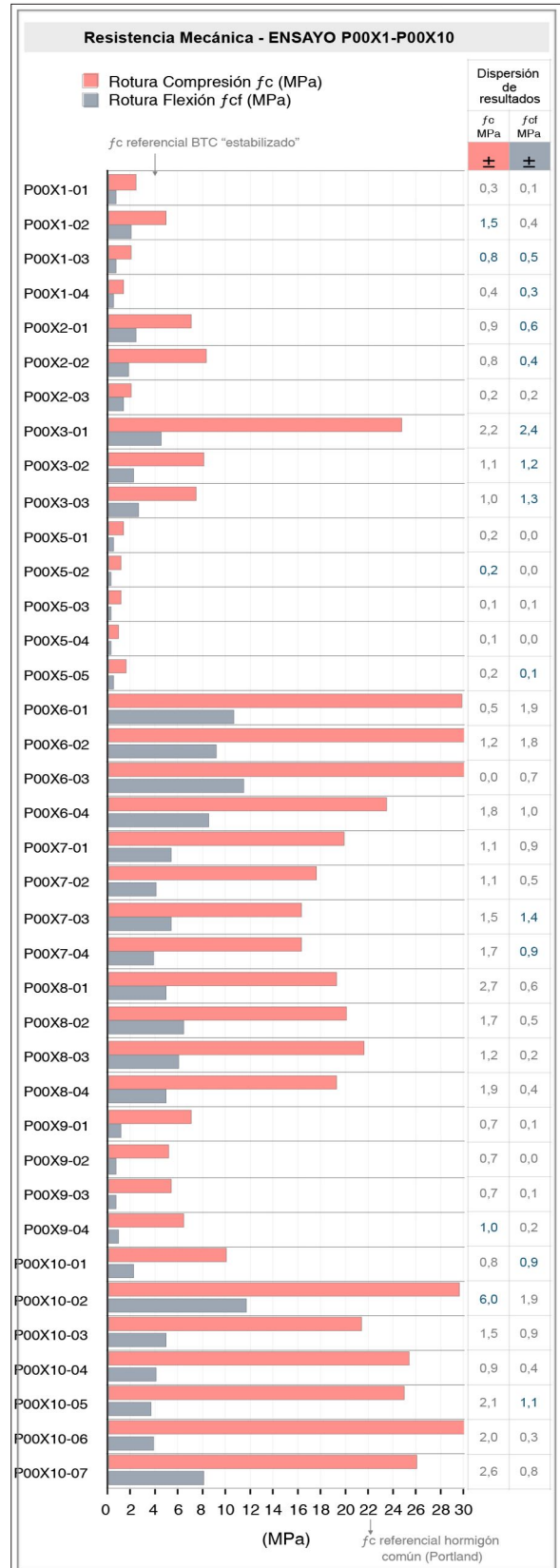
Fig. 6.9.6.4 Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental P. Los valores resaltados con azul muestran, en el caso de fc una dispersión de resultados mayor al 15% y en el caso de fcf mayor al 20%.

mecánicas de las muestras complejiza la determinación del rol que desempeña cada una de ellas.

A continuación, los resultados de la resistencia a compresión expuestos en este apartado sirven como variables de respuesta para el análisis del rol que cumplen los materiales que intervienen, así como la influencia de la temperatura y el tiempo de exposición: tarea que se aborda en los siguientes apartados.

Código	Nomenclatura descriptiva
P00X1-01	ATA-A0,5-RA0,36
P00X1-02	ATA-A0,5-RA0,20-NT20-CT80-H6
P00X1-03	ATA-A0,5-RA0,30-NT13-CT80-H6
P00X1-04	ATA-A0,5-RA0,36-NT36-CT80-H6
P00X2-01	ATA-A0,5-RA0,37-NM10-CT100-H24
P00X2-02	ATA-A1-RA0,49-NT10-CT100-H24
P00X2-03	ATA-A2-RA0,73-NT10-CT100-H24
P00X3-01	AC1-A1-RA0,41-NM10-RB0,11-CT100-H24
P00X3-02	ATA0,5-AC1-A1-RA0,27-NM10-RB0,11-CT100-H24
P00X3-03	ATA0,67-AC1-A1-RA0,24-NM10-RB0,11-CT100-H24
P00X4-01	AC1-A2-RA0,61-NM10-RB0,17-CT100-H4
P00X4-02	AC1-A3-RA0,81-NM10-RB0,23-CT100-H4
P00X4-03	AC1-A6,5-RA1,53-NM10-RB0,43-CT100-H4
P00X5-01	ATA-A1-RA0,50
P00X5-02	ATA-A1-RA0,50-CT100-H4
P00X5-03	ATA-A1-RA0,50-CT100-H24
P00X5-04	ATA-A1-RA0,50-CT100-H24
P00X5-05	ATA-A1-RA0,37-CT100-H24
P00X6-01	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT80-H48
P00X6-02	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC10,02-CT80-H48
P00X6-03	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC20,02-CT80-H48
P00X6-04	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC30,01-CT80-H48
P00X7-01	ATA-A10,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X7-02	ATA-A11-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X7-03	ATA-A11,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X7-04	ATA-A11,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X8-01	ATA-A20,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X8-02	ATA-A21-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X8-03	ATA-A21,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X8-04	ATA-A21,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X9-01	ATA-A30,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X9-02	ATA-A31-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X9-03	ATA-A31,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X9-04	ATA-A31,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4
P00X10-01	ATA-A1-RA0,17-NM10-RB0,05-RC00,24-CT110-H24
P00X10-02	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC40,10
P00X10-03	ATA-A1,2-RA0,33-NM10-RB0,09-RC50,01-CT110-H72
P00X10-04	ATA-A1-RA0,29-NM10-RB0,08-RC50,01-CT110-H72
P00X10-05	ATA-A1-RA0,29-NM10-RB0,08-RC50,01-CT110-H72
P00X10-06	ATA-A1-RA0,36-NM10-RB0,10-RC60,10
P00X10-07	ATA-A1-RA0,36-NM10-RB0,10-RC40,10

Fig. 6.9.6.5 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental POOX - izquierda). Fig. 6.9.6.6 Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental P (POOX-derecha). Los valores resaltados con azul muestran, en el caso de f_c una dispersión de resultados mayor al 15% y en el caso de f_{cf} mayor al 20%.



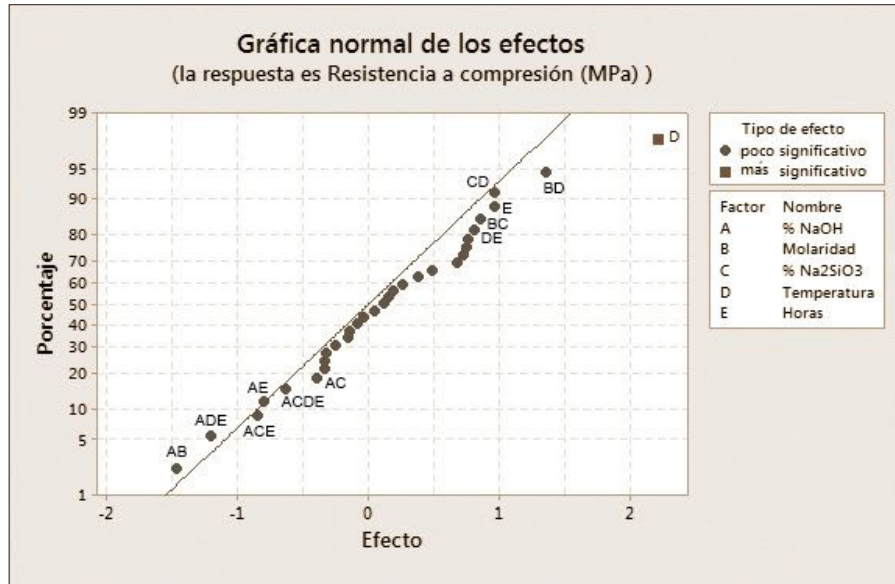


Fig. 6.10.1.2 Gráfica de los efectos de las variables que intervienen en la resistencia a compresión de las muestras de la Campaña GEO-A.

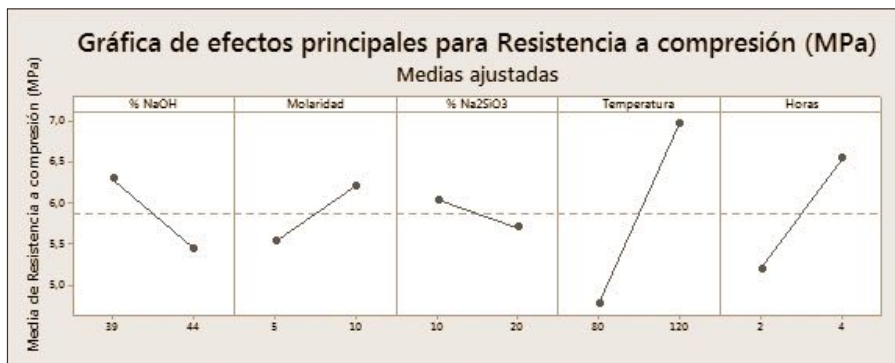


Fig. 6.10.1.3 Gráfica de efectos principales que afectan la resistencia a compresión de las muestras de la Campaña GEO-A.

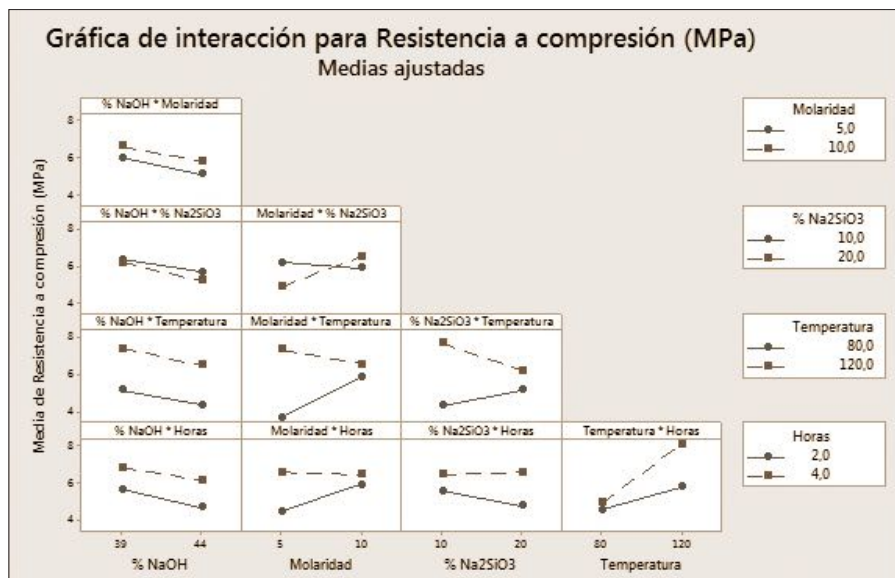


Fig. 6.10.1.4 Gráfica de interacción de variables y que intervienen en la resistencia a compresión de las muestras de la Campaña GEO-A.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE GEOPOLÍMEROS DE ARCILLAS EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA RESULTADOS, ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE VARIABLES EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

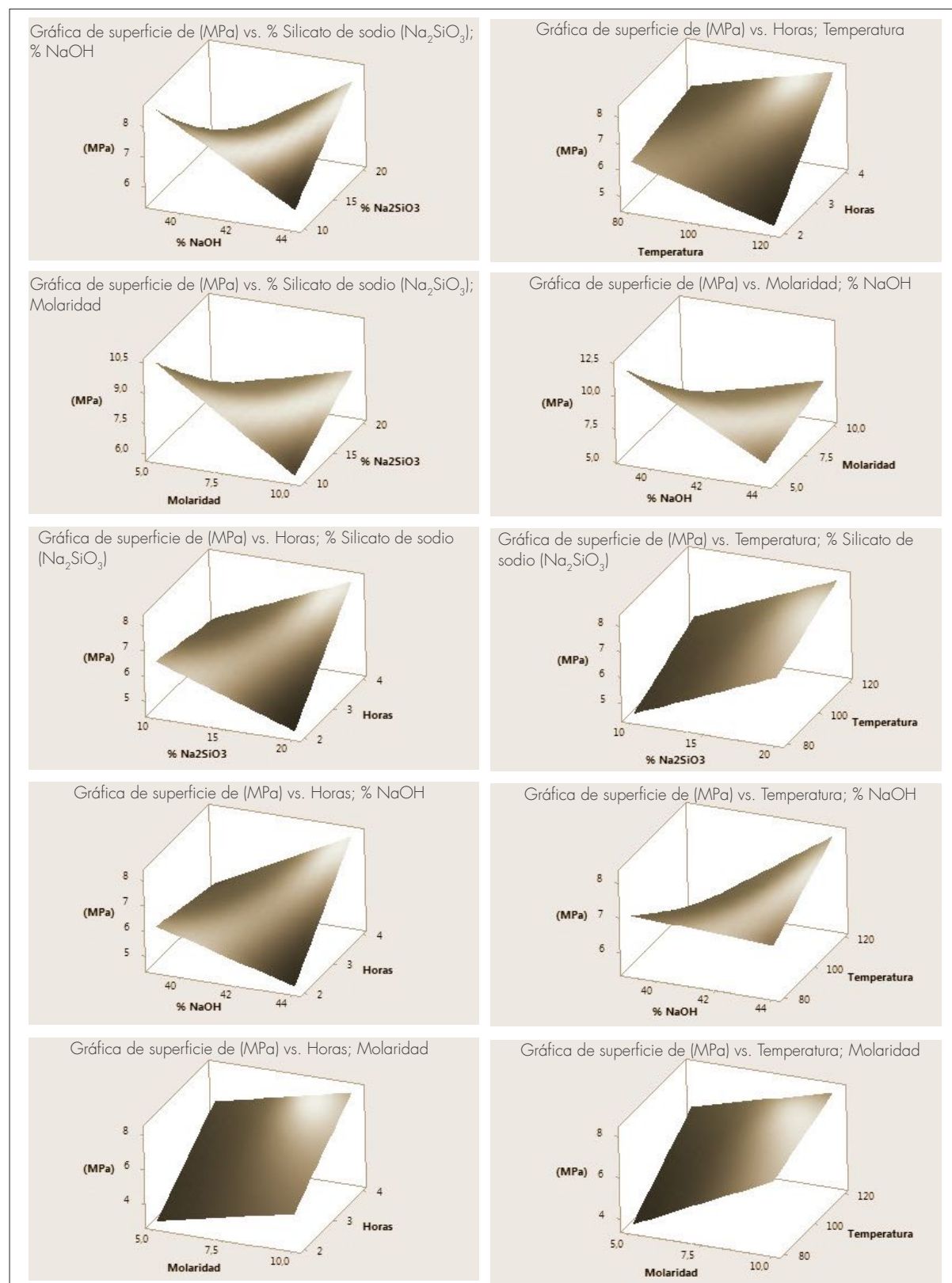


Fig. 6.10.1.5 Gráfica de superficie de respuestas de variables por par y sus efectos en la resistencia a compresión (MPa) - Campaña GEO-A.

exposición a temperatura (2 o 4 horas). Lo contrario ocurrió con el aumento en el porcentaje de silicato de sodio que tuvo un efecto negativo en la resistencia sin uso de calor, pero en interacción con la temperatura (80 o 100°C) y el tiempo de exposición a la temperatura (2 o 4 horas) contribuyó al aumento de la resistencia.

En cuanto a la temperatura (80 o 100°C) en interacción con el tiempo de exposición (2 o 4 horas), mostraron un impacto directo en la resistencia a la compresión. **La resistencia aumenta con el aumento de estas variables.** La Fig. 6.10.1.5 contiene los gráficos de las superficies de respuesta de la interacción de las diferentes variables en relación con la resistencia a la compresión.

Por otro lado, los resultados empíricos mostraron que los valores óptimos de las variables en relación con la resistencia a la compresión en las condiciones particulares de este experimento (GEO-A), eran los de la muestra GEO-A29 (ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT120-H4) es decir: un activador alcalino con 0,33 de agua y una concentración molar de 5M (NaOH); 0,08 de silicato de sodio y una temperatura de 120°C durante 4 horas. Esta muestra obtuvo una resistencia a la compresión de 11.8MPa.

3.8.2 Análisis factorial - Campaña GEO-B

El análisis factorial del diseño experimental GEO-B se realizó utilizando el software Minitab 18 con un total de 8 ensayos y 24 piezas de prueba fabricadas (tres para cada mezcla), tal como se muestra en el apartado 3.6: Diseño de experimentos, sección 3.6.2, Campaña experimental GEO-B.

Los resultados y el análisis estadístico factorial de dos niveles muestra la sinergia entre las tres variables que intervienen: la concentración molar (5-10M), el porcentaje de silicato de sodio y el tipo de hidróxido seleccionado (NaOH-KOH). La Fig. 6.10.2.1 y la Fig. 6.10.2.2 muestran los efectos producidos por las variables y su interacción en la resistencia de compresión simple de las muestras del experimento GEO-B. El resto de factores que intervienen se mantienen constantes: 1,0 arena, 0,3 de agua y 80°C durante 24 horas.

De todas las variables estudiadas, la concentración molar y la interacción de esta con otras variables jugó un papel determinante en la polimerización y en la resistencia a la compresión final alcanzada. Esto corrobora los estudios realizados por Hounsi, A. et. al. en su artículo: "How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural

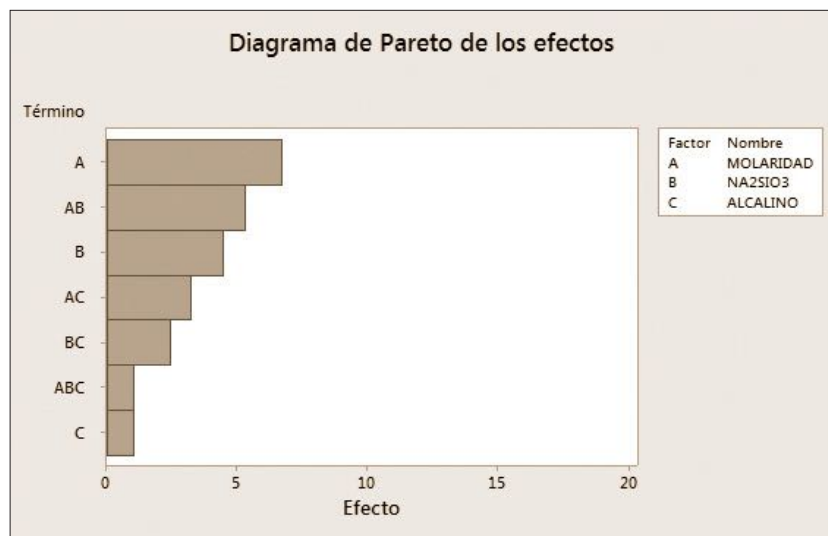


Fig. 6.10.2.1 Pareto de los efectos de las variables que intervienen en la resistencia a compresión de las muestras de la Campaña GEO-B.

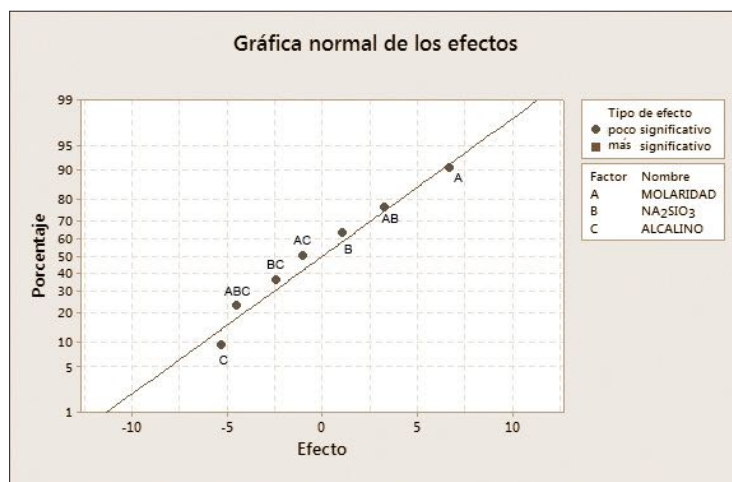


Fig. 6.10.2.2 Gráfica de los efectos de las variables en la resistencia a compresión (MPa) - Campaña GEO-B.

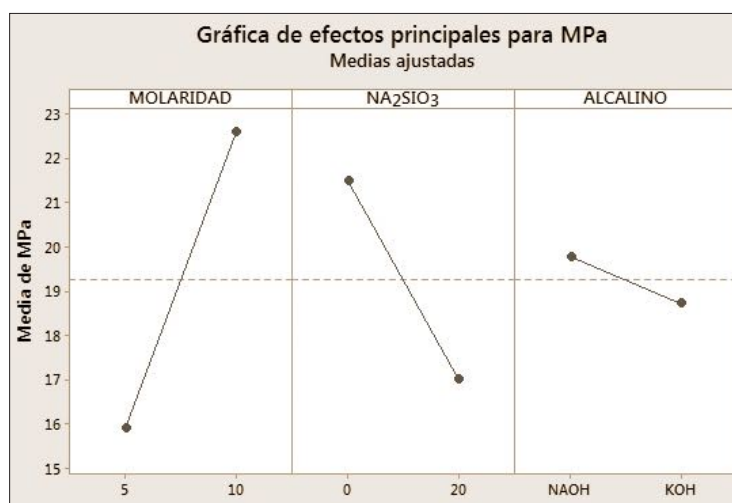


Fig. 6.10.2.3 Gráfica de efectos principales que afectan la resistencia a compresión (MPa) - Campaña GEO-B.

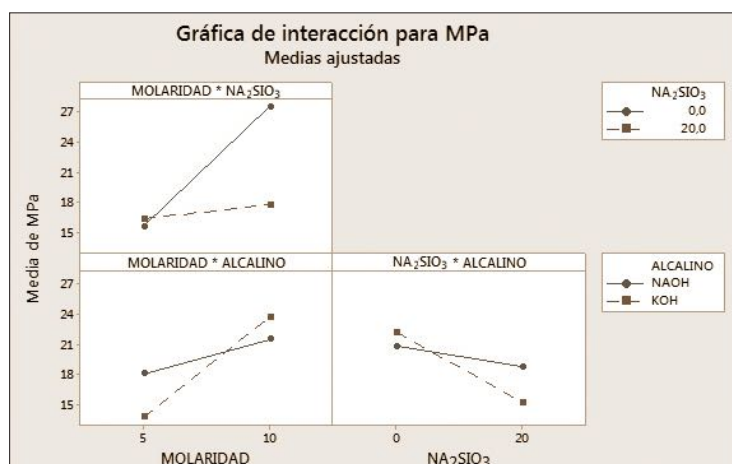


Fig. 6.10.2.4 Gráfica de interacción de variables y sus efectos en la resistencia a compresión (MPa) - Campaña GEO-B.

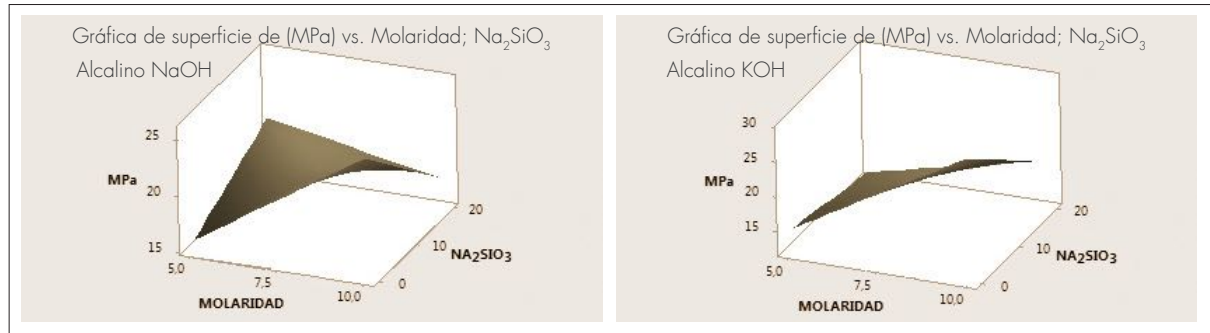


Fig. 6.10.2.5 Gráfica de superficie de respuestas de variables por par y sus efectos en la resistencia a compresión (MPa) - Campaña GEO-B.

characteristic of kaolin-based geopolymers". [2].

En la Fig. 6.10.2.3 se muestran los principales efectos de cada variable sobre la resistencia a la compresión y en la Fig. 6.10.2.4 se muestra el efecto de la interacción de las variables en la resistencia a la compresión.

Se observó que **el aumento de la concentración molar de 5M a 10M, independientemente del tipo de activador (NaOH o KOH), provocó el aumento de la resistencia a la compresión.** Por otro lado se observó que **la incorporación de Na₂SiO₃ redujo los valores de resistencia a compresión en todos los casos.**

La Fig. 6.10.2.5 contiene los gráficos de las superficies de respuesta de la interacción de las diferentes variables en relación con la resistencia a la compresión. Los resultados empíricos mostraron que los valores óptimos de las variables en relación con la resistencia a la compresión en las condiciones particulares de este experimento (GEO-B), fueron los de la muestra GEO-B03 (ATA-A1-RAO,3-KM10-CT80-H24) es decir, con una concentración molar de 10M de una solución alcalina a base de KOH y sin silicato de sodio. Esta muestra obtuvo una resistencia a la compresión de 29,3MPa. En general, en comparación con las muestras de la campaña GEO-A, se observó un incremento

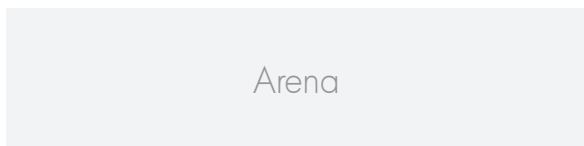
importante de la resistencia a la compresión de todas las muestras de la campaña GEO-B.

En la campaña experimental GEO-B también se observó que los resultados de resistencia a compresión de las probetas fabricadas con activador alcalino a base de NaOH son más próximas entre sí que los resultados obtenidos usando KOH. De todos modos, con el uso de KOH se obtuvo la resistencia a compresión más alta esta la campaña experimental corroborando lo señalado por Xu, H. y Deventer, J. [3]. **Los resultados observados también evidenciaron que el uso de silicato de sodio (Na₂SiO₃) es prescindible y no garantiza una buena resistencia a compresión,** tal como se observa en las muestras GEO-B03 (ATA-A1-RAO,3-KM10-CT80-H24) y GEO-B01 (ATA-A1-RAO,3-NM10-CT80-H24), al contrario, la adición de silicato de sodio, en esta campaña experimental, perjudicó la resistencia a compresión final de las muestras.

A continuación, tomando en cuenta todas las campañas experimentales realizadas, se analiza el rol general de cada una de las variables que intervienen en el comportamiento mecánico: influencia de la arena, influencia del agua, influencia de la concentración y tipo de activador alcalino, influencia de la adición de silicato de sodio, influencia de la temperatura y tiempo de exposición y la influencia de la adición de otros aditivos como la cal y fluidificantes de hormigón.

2 Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G., Djétéli, G., Blanchart, P., Alowanou, D., Kpelou, P., et. al. (2014). *How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural characteristic of kaolin-based geopolymers.* *Ceramics International*, 40(7 PART A), 8953–8962. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.02.052>.

3 Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). *The geopolymerisation of alumino-silicate minerals.* *Mineral Processing*. p. 247



3.8.3 Influencia de la arena

La arena mejoró la trabajabilidad del material y funcionó como “desengrasante” de la arcilla.

Se analizó la influencia de la proporción y tamaño de partícula de arena en función a la resistencia a compresión y la trabajabilidad del material mediante los ensayos P00X7, P00X8, P00X9, P01, P02, P03 y P07 (Detallados en los apartados y anexos respectivos).

En los ensayos P00X7, P00X8 y P00X9 se probó arena de diferente tamaño de partícula. Se observó que los mejores resultados fueron obtenidos con la arena de grano más fino (Arena sílicea (Standard) L-105115) caracterizada en el apartado 3.4.1 y seleccionada para el resto de ensayos.

En los ensayos mencionados también se probaron diferentes proporciones de arena. En los ensayos P1 y P2 (Fig. 6.10.3.1 y Fig. 6.10.3.2) se probó un rango entre 0,25 y 1,50 en relación al peso de la arcilla. Se observó una leve tendencia de disminución de la resistencia con el aumento de arena. En el ensayo P03 (Fig. 6.10.3.3) se probó un rango entre 0,50 y 1,50 en relación al peso de la arcilla. La probeta P03-02 mostró el mejor comportamiento mecánico con una relación 1:1 arcilla-arena.

En el ensayo P07-03 (Fig. 6.10.3.4) no se observó una tendencia clara como en el caso del ensayo P00X7 (Fig. 6.10.3.5) debido a la acción del resto de variables que intervienen.

En conclusión podríamos decir que no se observó una tendencia definitiva en cuanto al rol de la proporción de arena en relación a la resistencia a compresión simple final pero si en cuanto al tamaño de partícula. **Mientras más pequeño fue el tamaño de partícula de los granos de arena mayor fue el grado de consolidación arcilla-arena.**

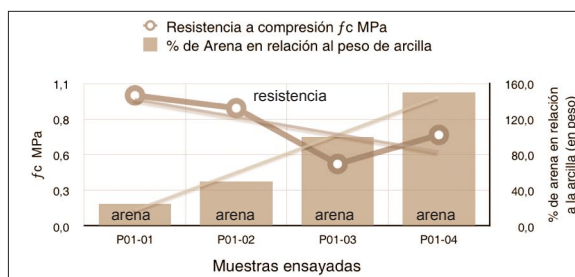


Fig. 6.10.3.1 Probetas de ensayo P01.

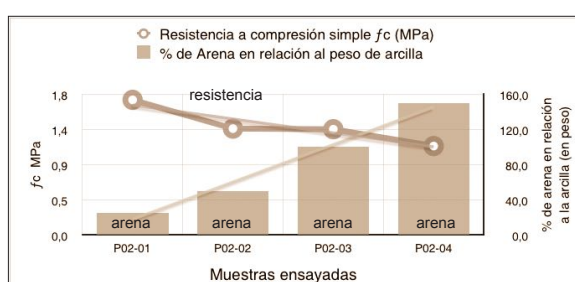


Fig. 6.10.3.2 Probetas de ensayo P02.

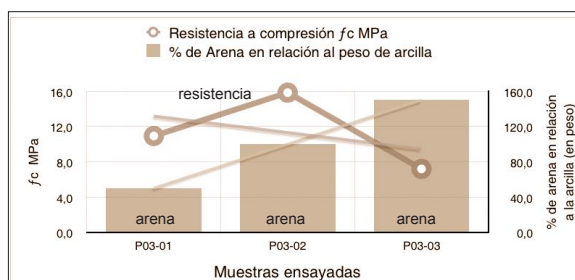


Fig. 6.10.3.3 Probetas de ensayo P03.

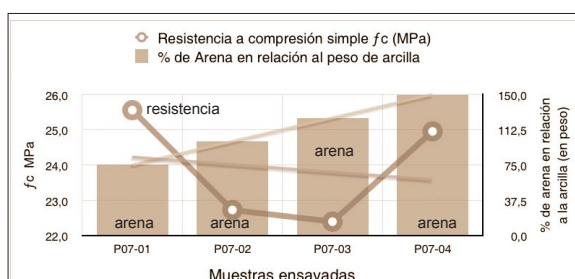


Fig. 6.10.3.4 Probetas de ensayo P07.

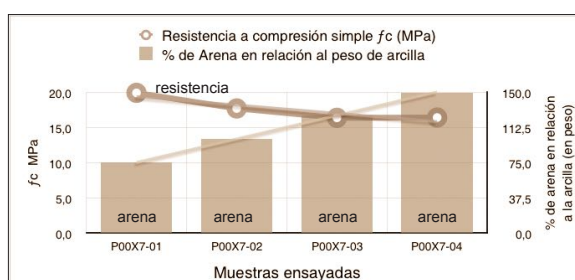
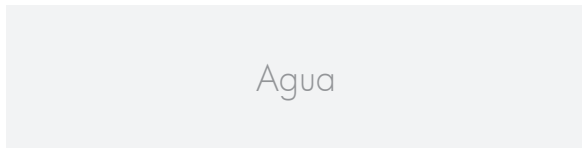


Fig. 6.10.3.5 Probetas de ensayo P00X7.

Se concluyó que la relación 1:1 (arcilla-arena), es decir la misma cantidad de arena que la arcilla en peso, permitió una mejor trabajabilidad de los materiales precursores. Por esta razón se decidió utilizar esta proporción para la mayoría de ensayos complementarios.



3.8.4 Influencia del agua

El agua, que forma parte de la solución alcalina, proporcionó un medio de reacción y aseguró la trabajabilidad de la mezcla durante el proceso de fabricación de las probetas.

Se analizó la influencia de la cantidad de agua utilizada en función de la resistencia a compresión y la trabajabilidad del material mediante los ensayos P02, P03, P04 (Fig. 6.10.4.5) y los ensayos GEO-C1 (Fig. 6.10.4.1), GEO-C2 (Fig. 6.10.4.2), GEO-C5 (Fig. 6.10.4.3) y GEO-C6 (Fig. 6.10.4.4).

En todos los ensayos se observó una clara tendencia a la disminución de la resistencia a compresión con el incremento de agua. Se comprobó que las mezclas que tenían un contenido de agua próximo al límite plástico (20,03%) de la arcilla Tipo A, mostraron mejores propiedades resistentes que aquellas que tenían un contenido de agua próximo al límite líquido (34,2%).

El mayor inconveniente en la reducción de la cantidad de agua fue la dificultad para trabajar con la mezcla ya que la adición de NaOH y Na₂SiO₃ reducían la plasticidad de la arcilla a los pocos segundos de contacto. Por esta razón se seleccionaron dosificaciones que estaban en un rango de 24-32% de agua en relación al peso de la arcilla, dependiendo de la concentración molar y el resto de variables implicadas.

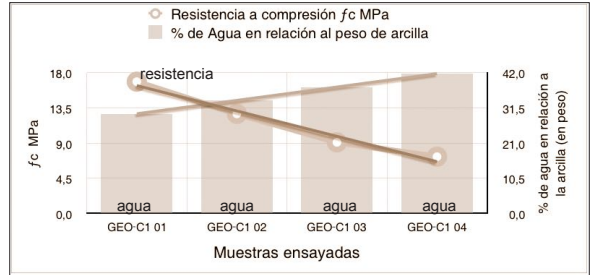


Fig. 6.10.4.1 Probetas de ensayo GEO-C1.

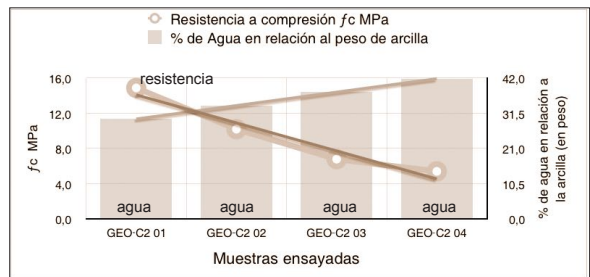


Fig. 6.10.4.2 Probetas de ensayo GEO-C2.

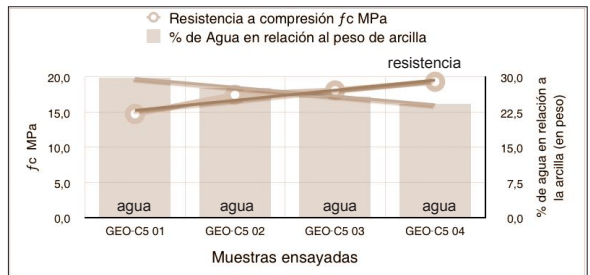


Fig. 6.10.4.3 Probetas de ensayo GEO-C5.

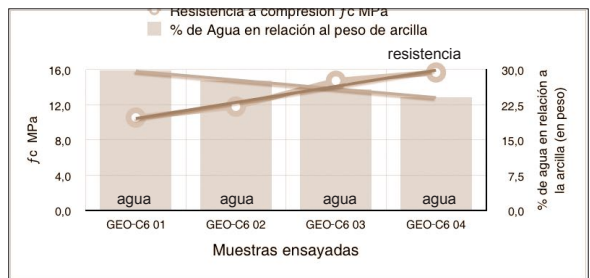


Fig. 6.10.4.4 Probetas de ensayo GEO-C6.

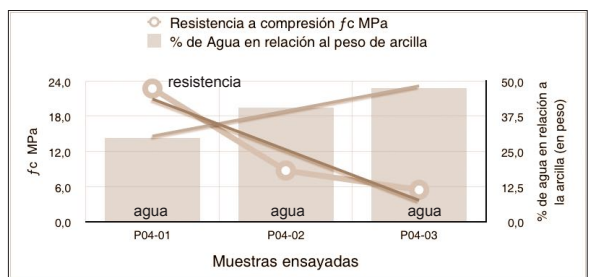


Fig. 6.10.4.5 Probetas de ensayo P04.

Activador alcalino

3.8.5 Influencia de la concentración y tipo de activador alcalino

Como activador alcalino se utilizó NaOH y KOH. Se analizó la influencia de la concentración y el tipo de alcalino utilizado en función de la resistencia a compresión mediante los ensayos P02 y los ensayos GEO-B, GEO-C5 y GEO-C6.

En todos los casos se observó una tendencia marcada que evidenció la disminución de resistencia a compresión con la disminución de la concentración del hidróxido alcalino, ya sea NaOH o KOH. La comparación entre la probeta P02-01 y las probetas GEO-B02 y GEO-B01 (Fig. 6.10.5.1), elaboradas con NaOH con concentración molar 1M, 5M y 10M respectivamente, ejemplificó esto. El análisis de los ensayos GEO-C5 (Fig. 6.10.5.3) y GEO-C6 (Fig. 6.10.5.2) elaborados con KOH con concentración molar 8M, 10M, 12M y 14M también evidenció lo antes mencionado: **a mayor molaridad mayor resistencia.**

En el ensayo GEO-B parte 1 (Fig. 6.10.5.4) y GEO-B parte 2 (Fig. 6.10.5.5) se evaluó el desempeño de probetas elaboradas con NaOH y KOH bajo las mismas condiciones, con concentración molar de 5M y 10M. Los gráficos, evidenciaron un incremento de la resistencia con el aumento de concentración y mostraron un mejor desempeño de KOH en función a la resistencia a compresión alcanzada por las probetas del ensayo GEO-B parte 2, aunque en general, al tomar en cuenta todas las campañas experimentales se observó que las muestras fabricadas con NaOH fueron, en conjunto, más estables que las muestras fabricadas con KOH corroborando el estudio de Hounsi [1].

En ningún caso se experimentó con concentraciones molares mayores a 14M debido a que, como criterio de partida, se decidió utilizar la menor cantidad de aditivos que permitan alcanzar

resistencias comparables a las del ladrillo cerámico (aproximadamente 20MPa).

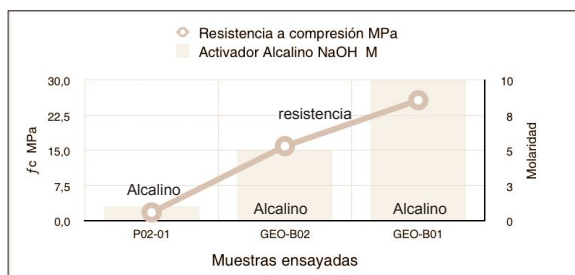


Fig. 6.10.5.1 Probetas de ensayo P02-01, GEO-B02 y GEO-B01.

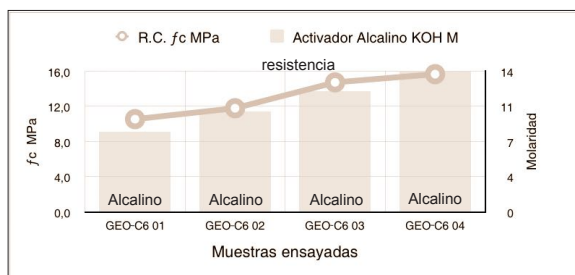


Fig. 6.10.5.2 Probetas de ensayo GEO-C6.

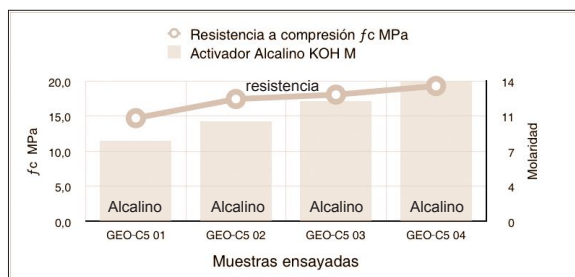


Fig. 6.10.5.3 Probetas de ensayo GEO-C5.

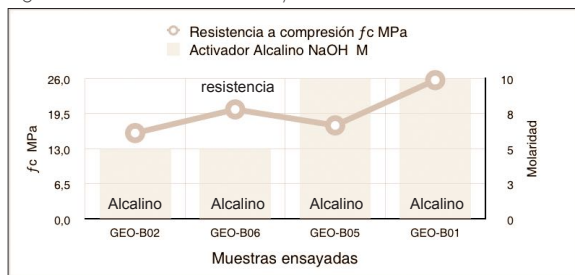


Fig. 6.10.5.4 Probetas de ensayo GEO-B (parte 1).

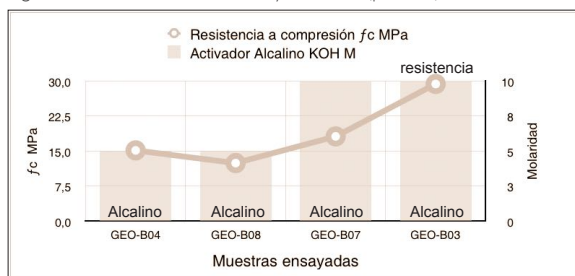


Fig. 6.10.5.5 Probetas de ensayo GEO-B (parte 2).

1 Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G., Djétéli, G., Blanchart, P., Alowanou, D., Kpelou, P., et. al. (2014). op. cit.

Silicato de sodio (Na_2SiO_3)

3.8.6 Influencia de la adición de silicato de sodio

Se analizó la influencia de la adición de silicato de sodio (apartado 3.4.3) en función de la resistencia a compresión mediante los ensayos P03, P04, P05, P06, P07, y los ensayos GEO-B (parte 1 y parte 2), GEO-C1, GEO-C2, GEO-C3, GEO-C4, GEO-C5 y GEO-C6.

Todos los ensayos evidenciaron la relación entre el efecto de la adición de silicato de sodio y cierta variación de la resistencia a compresión. De todos modos este efecto trabajó en sinergia con el resto de factores que intervinieron, especialmente el tipo de hidróxido utilizado, la concentración molar, la temperatura y el tiempo de exposición.

La comparación entre la probeta GEO-B02 y la probeta GEO-B06 (Fig. 6.10.6.1) mostró un aumento de resistencia a compresión con la adición de silicato de sodio. Estas muestras fueron elaboradas con hidróxido de sodio con una concentración molar de 5M.

En contraste, la comparación entre la probeta GEO-B01 y la probeta GEO-B05 (Fig. 6.10.6.2) mostró una disminución de resistencia a compresión con la adición de silicato de sodio. Estas muestras fueron elaboradas con hidróxido de sodio con una concentración molar de 10M.

En el caso de usar hidróxido de potasio, ya sea con una concentración molar de 5M (Fig. 6.10.6.3) o 10M (Fig. 6.10.6.4), se vio una disminución de la resistencia a compresión con la adición del silicato de sodio. Lo mismo sucedió al comparar las muestras de los ensayos GEO-C1 y GEO-C2 (Fig. 6.10.6.5). En todas las muestras se observó una disminución de la resistencia al usar silicato de sodio. Por tanto **se concluyó que el silicato de sodio es prescindible.**

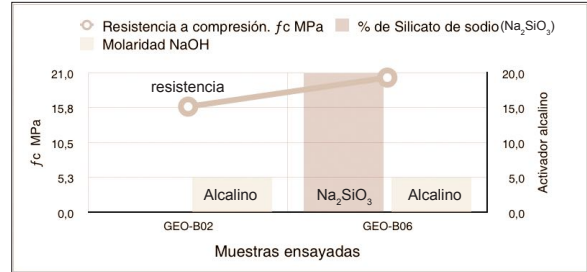


Fig. 6.10.6.1 Probetas de ensayo GEO-B02 y GEO-B06.

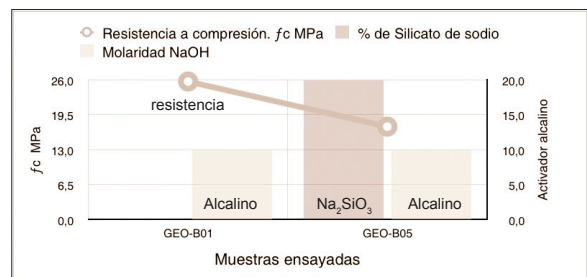


Fig. 6.10.6.2 Probetas de ensayo GEO-B01 - GEO-B05.

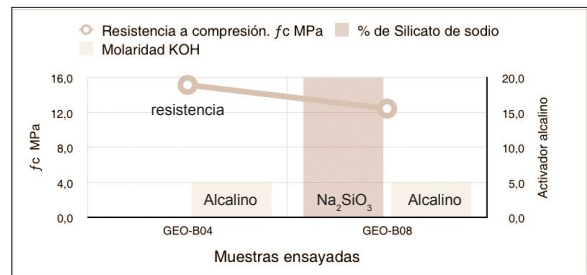


Fig. 6.10.6.3 Probetas de ensayo GEO-B04 - GEO-B08.

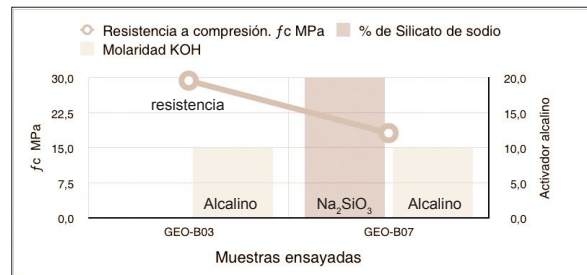


Fig. 6.10.6.4 Probetas de ensayo GEO-B03 - GEO-B07.

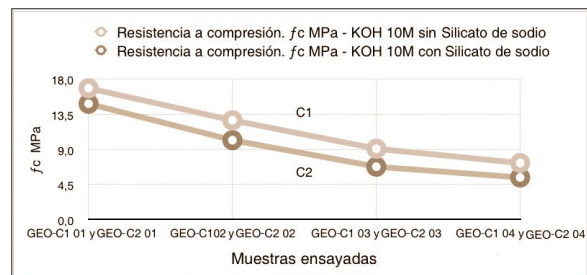


Fig. 6.10.6.5 Probetas de ensayo GEO-C1 y GEO-C2.

Temperatura y tiempo

3.8.7 Influencia de la temperatura y tiempo de exposición

Todos los ensayos evidenciaron que la temperatura y el tiempo de exposición jugaron un papel determinante en la resistencia a compresión final de las probetas. Sin embargo, el análisis de los resultados demostró que estos factores trabajaron en sinergia con el resto de variables: agua, NaOH o KOH, concentración molar y Na_2SiO_3 (si es el caso).

En la mayoría de ensayos se observó una tendencia marcada que evidenciaba la disminución de resistencia a compresión con la disminución de la temperatura y/o tiempo de exposición. La comparación entre la probeta GEO-A03, GEO-A19, GEO-A11 y GEO-A27 (Fig. 6.10.7.1), y el análisis de las probetas GEO-C 03 (Fig. 6.10.7.5), mostró claramente la tendencia de la mayoría de casos: **a más tiempo de exposición más resistencia**. Por otro lado, los ensayos GEO-A07, GEO-A23, GEO-A15 y GEO-A31 (Fig. 6.10.7.2) mostraron que lo señalado anteriormente no es una regla y que la temperatura por si sola no garantiza un aumento de resistencia. En el ensayo P05 (Fig. 6.10.7.3) se pudo observar que el incremento del tiempo de exposición a temperatura de 4 a 7 horas no tuvo una repercusión significativa en la resistencia, mientras que en el ensayo P06 (Fig. 6.10.7.4) sí, esto debido al resto de factores: cantidad de agua y adición de silicato de sodio.

Ensayos realizados sin influencia de temperatura (curado inicial), es decir únicamente un curado a temperatura de laboratorio (muestras P06-01, GEO-C 03 01, GEO-C 04 01, P05-01, P06-01) no obtuvieron resistencias destacables pero mostraron mejor desempeño mecánico en comparación a probetas fabricadas sin aditivos alcalinos, es decir bloques comunes de arcilla, arena y agua. De todos modos las temperaturas entre 80 y 110°C durante más de 4 horas promueven resistencias superiores a los 20MPa con una formulación correcta (considerando las otras variables).

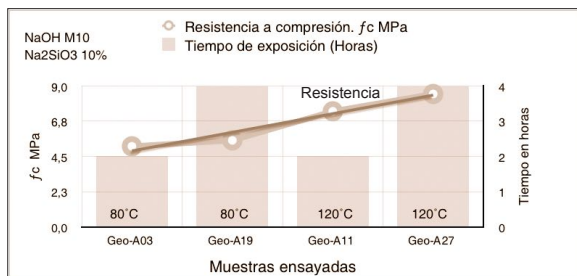


Fig. 6.10.7.1 Probetas de ensayo GEO-A (03, 19, 11, 27).

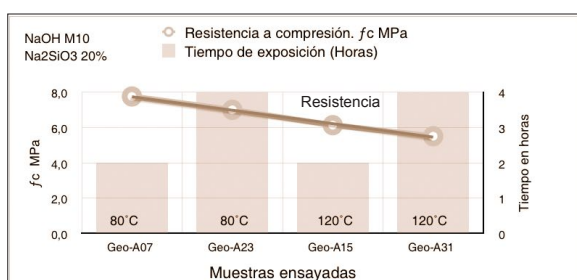


Fig. 6.10.7.2 Probetas de ensayo GEO-A (07, 23, 14, 31).

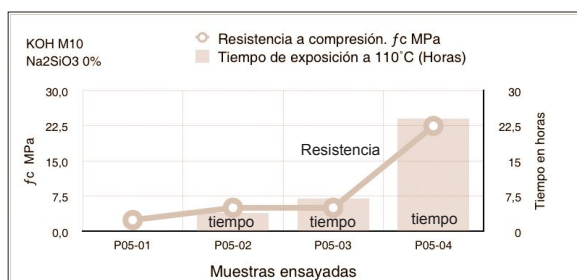


Fig. 6.10.7.3 Probetas de ensayo P05.

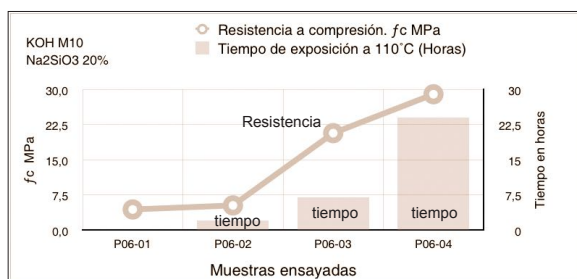


Fig. 6.10.7.4 Probetas de ensayo P06.

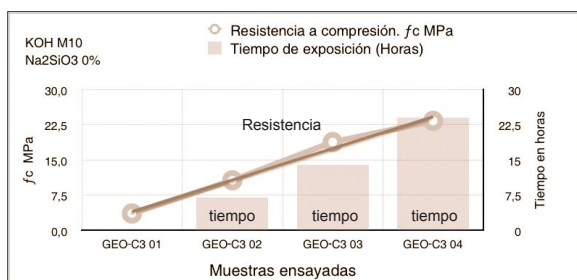


Fig. 6.10.7.5 Probetas de ensayo GEO-C 03.

Adición de Cal

3.8.8 Influencia de la adición de cal

Se evaluó si la adición de “cal viva”, como captador de agua y generador de calor, influye en la resistencia a compresión final en los ensayos P00X10 (02, 06, 07) y de los ensayos GEO-D1 y GEO-D2.

En el ensayo GEO-D1 (Fig. 6.10.8.1) se analizó el comportamiento de probetas con adición de “cal viva” (CaO) en 0,06, 0,10, 0,14 y 0,18 en relación al peso de la arcilla. Se observó un incremento en la resistencia a compresión de las probetas que tenían más de 0,10 de cal. Estas probetas fueron curadas a 80°C durante 24 horas.

A diferencia del ensayo GEO-D1, en el ensayo GEO-D2 (Fig. 6.10.8.2) se siguió el mismo procedimiento sin la exposición de las muestras a temperatura, dejándolas secar en condiciones ambientales de laboratorio. Las probetas mostraron un comportamiento mecánico inferior en comparación con las del ensayo GEO-D1.

Al comparar probetas similares en composición y curado inicial a una temperatura de 80°C (Fig. 6.10.8.3) se observó que la adición de cal no contribuyó a la mejora de la resistencia a compresión pero al comparar probetas similares en composición y sin curado inicial a temperatura, se observó que la cal contribuyó al incremento de la resistencia a compresión (Fig. 6.10.8.4). Esto se observó en el ensayo P00X10 (Fig. 6.10.8.5) en el que se evidenció que la “cal viva” (CaO) incrementó la resistencia a compresión de probetas con silicato de sodio curadas a temperatura de laboratorio.

Se concluyó que la cal (CaO) contribuyó a mejorar la resistencia a compresión de las probetas curadas a temperatura ambiente pero no tuvo ningún efecto relevante en las probetas sometidas a calor y por tanto fue prescindible en este último caso.

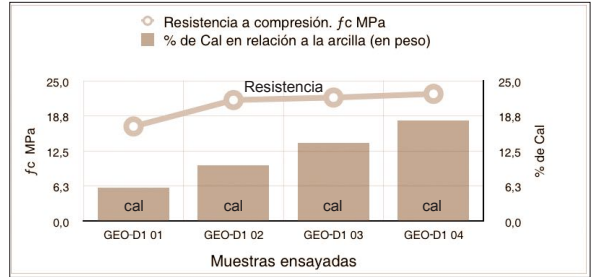


Fig. 6.10.8.1 Ensayo GEO-D1.

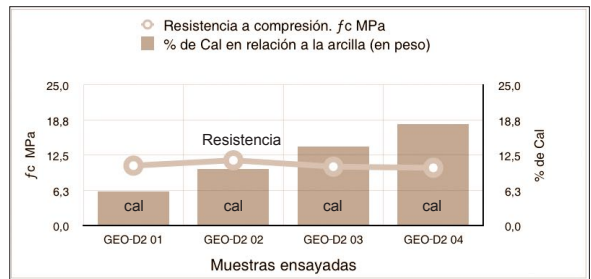


Fig. 6.10.8.2 Probetas de ensayo GEO-D2.

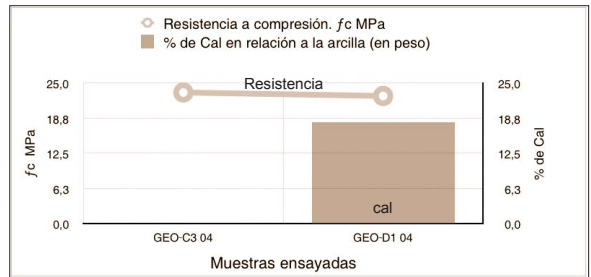


Fig. 6.10.8.3 Probetas de ensayo GEO-C3 04 (sin cal) y GEO-D1 04 (con cal).

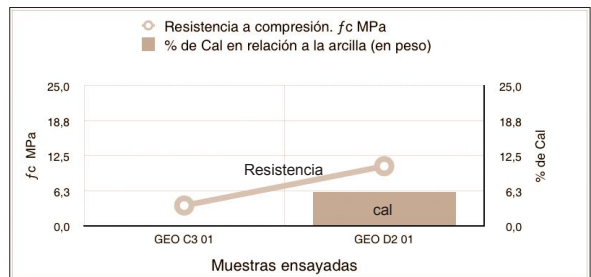


Fig. 6.10.8.4 Probetas de ensayo GEO-C3 01 (sin cal) - GEO-D2 01 (con cal).

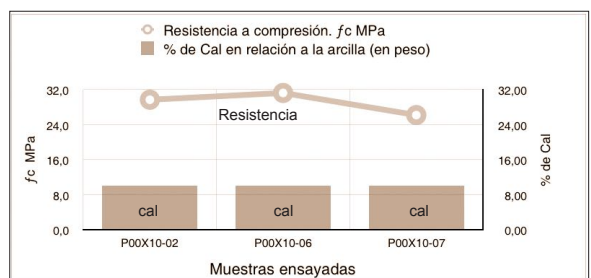


Fig. 6.10.8.5 Probetas de ensayo P00X10 (02,06,07).

Otros aditivos

3.8.9 Influencia de la adición otros aditivos

Se realizaron pruebas piloto que demostraron que **la adición de aditivos plastificantes mejoró la resistencia final del material**. En el experimento piloto P00X6 (probetas 01, 02, 03) se probó la influencia de aditivos plastificantes de hormigón: Sikament 165 ES, Sikament FF y ViscoCrete 125 (0,075, 0,12, 0,128 en relación al peso de la arcilla). Como se observa en la gráfica de la Fig. 6.10.9.1, se obtuvieron probetas con resistencia a compresión de 35,2MPa, 32,6MPa y 32,3MPa respectivamente.

La comparación de probetas con y sin aditivo: P00X6-01 y P06-04 evidenció el incremento de resistencia a compresión (Fig. 6.10.9.2).

Se deduce que la adición de aditivos contribuye a la mezcla, disolución e interacción de los aluminosilicatos con el activador alcalino. Además ayuda a disminuir el contenido de agua de la mezcla. Esto se refleja en una mejor polimerización, una red estructural más densa y en mayor resistencia a compresión simple de las muestras. El estudio del uso plastificantes y defloculantes en geo-polímeros de arcilla podría constituir una futura línea de investigación.

Formulaciones óptimas

3.8.10 Formulaciones óptimas en función de la resistencia a compresión

Desde el punto de vista mecánico, sin considerar las muestras con aditivos fluidificadores, se consideraron óptimas las formulaciones que superaron los 20MPa de resistencia a la compresión simple ya que compiten con los ladrillos cerámicos. En la campaña experimental GEO-A ninguna de las muestras alcanzó esta resistencia, mientras que en

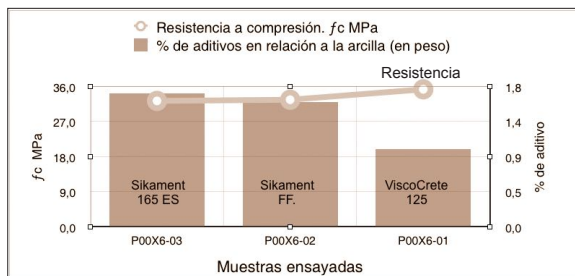


Fig. 6.10.9.1 Probetas de ensayo P00X6 (03, 02, 01).

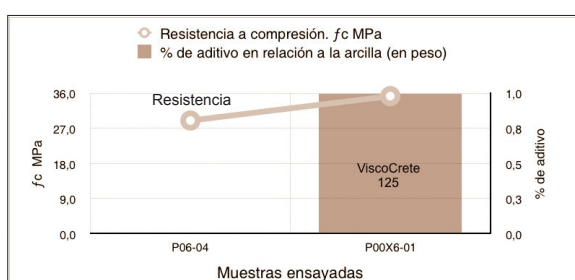


Fig. 6.10.9.2 Probetas de ensayo P06-04 y P00X6-01.

la campaña experimental GEO-B tres muestras alcanzaron resistencias superiores: GEO-B01 (25,7MPa), GEO-B03 (29,3MPa) y GEO-B06 (20,2MPa). En la campaña experimental GEO-C una muestra: GEO-C304 (23,3MPa). En la campaña GEO-D tres muestras: GEO-D102 (21,6MPa), GEO-D103 (22,0MPa) y GEO-D104 (22,7MPa). En la campaña experimental GEO-E ninguna muestra superó los 20MPa.

Las muestras que no polimerizaron correctamente, en comparación con las muestras citadas, mostraron deficiencia mecánica (resistencia a compresión por debajo de 8MPa). Como se esperaba la influencia del hidróxido metálico en las fases sin polimerizar de estas muestras provocaron eflorescencias superficiales.

En las pruebas piloto se detectaron 8 muestras que superaron los 20MPa: P04-01 (22,7MPa), P05-04 (22,5MPa), P06-03 (20,7MPa), P06-04 (29,0MPa), P07-01 (25,6MPa), P07-02 (22,7MPa), P07-03 (22,4MPa) y P07-04 (24,9MPa). En la tabla de la Fig. 6.10.10.1 se detalla la información de las dosificaciones, los procedimientos de curado y el desempeño mecánico de estas muestras.

Los valores óptimos de las variables fueron: arena entre 0,75 y 1,50; el contenido de agua entre

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE GEOPOLÍMEROS DE ARCILLAS EN FUNCIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA
RESULTADOS, ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE VARIABLES EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Formulación de muestras con resistencia a compresión superior a 20 MPa											
Nomenclatura	Código	Áridos		Activador alcalino		Aditivo B	Aditivo C	Curado Térmico		Resultado	
		Arcilla Tipo A	Arena silíceas	Cantidad de agua	Concentración molar (NaOH[NM] o KOH [KM])		Na ₂ SiO ₃	Cal viva	Temperatura	Tiempo de exposición	Resistencia a compresión
		ATA	A	RA	NM	KM	RB	RC ₄	°C CT	Horas H	MPa f _c
ATA-A1-RA0,3-NM5-RB0,07-CT80-H24	GEO-B06	1,00	1,00	0,30	5	-	0,07	-	80	24	20
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H7	P06-03	1,00	1,00	0,30	10	-	0,08	-	110	7	21
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,10-CT80-H24	GEO-D1 02	1,00	1,00	0,32	-	10	-	0,10	80	24	22
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,14-CT80-H24	GEO-D1 03	1,00	1,00	0,32	-	10	-	0,14	80	24	22
ATA-A1,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-03	1,00	1,25	0,30	10	-	0,08	-	100	4	22
ATA-A1-RA0,36-NM10-CT110-H24	P05-04	1,00	1,00	0,36	10	-	-	-	110	24	22
ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₄ 0,18-CT80-H24	GEO-D1 04	1,00	1,00	0,32	-	10	-	0,18	80	24	23
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H96	P04-01	1,00	1,00	0,30	10	-	0,08	-	100	96	23
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-02	1,00	1,00	0,30	10	-	0,08	-	100	4	23
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24	GEO-C3 04	1,00	1,00	0,30	-	10	-	-	80	24	23
ATA-A1,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-04	1,00	1,50	0,30	10	-	0,08	-	100	4	25
ATA-A0,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-01	1,00	0,75	0,30	10	-	0,08	-	100	4	26
ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-B01	1,00	1,00	0,30	10	-	-	-	80	24	26
ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H24	P06-04	1,00	1,00	0,30	10	-	0,08	-	110	24	29
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24	GEO-B03	1,00	1,00	0,30	-	10	-	-	80	24	29

Fig. 6.10.10.1 Formulaciones de las probetas que mostraron mejor comportamiento mecánico (mayor a 20MPa).

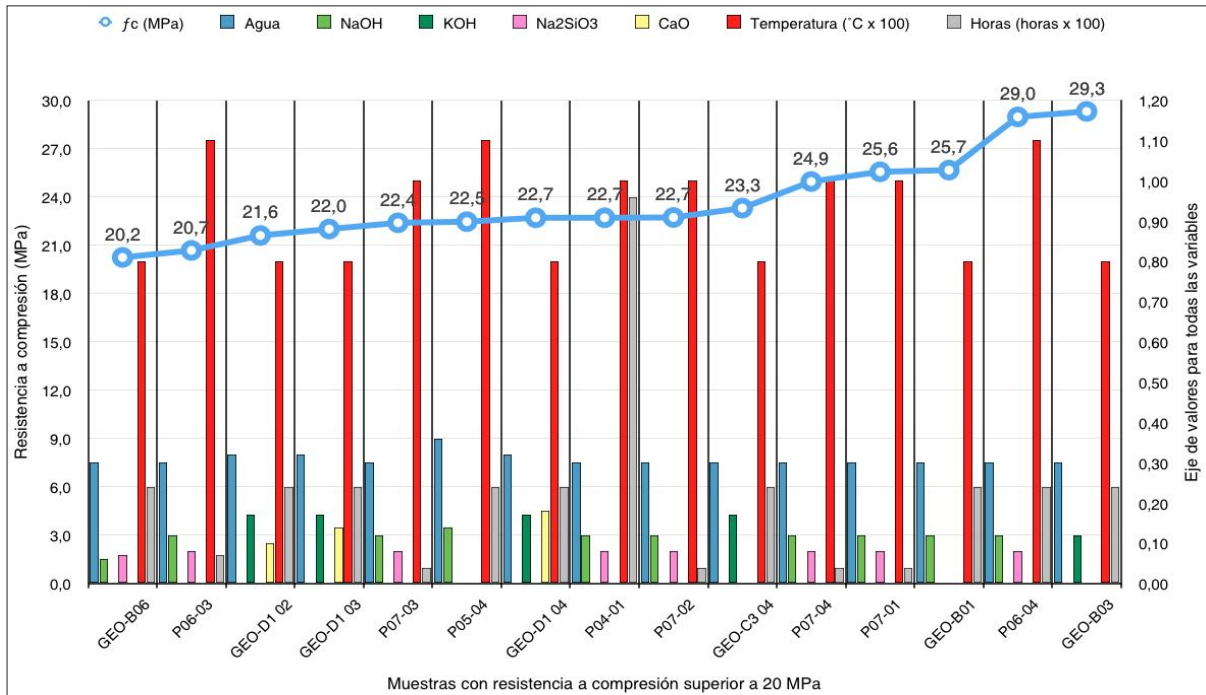


Fig. 6.10.10.2 Tabla resumen de muestras con mayor comportamiento mecánico (mayor a 20MPa).

0,30 y 0,36; NaOH o KOH entre 0,06 y 0,14 o 0,12 y 0,17, es decir, concentración molar entre 5M a 10M, siendo preferible la segunda para garantizar una correcta polimerización; Na₂SiO₃ entre 0,00 y 0,08; una temperatura entre 80°C y 110°C y un tiempo de exposición a temperatura entre 4 y 96 horas.

De las formulaciones óptimas se observó que los mejores resultados obtuvieron las muestras que en relación al peso de la arcilla contenían: 1,00 de arena; 0,30 de agua; 0,12 de hidróxido alcalino (NaOH o KOH), es decir una concentración molar de 10M y con temperaturas de 80°C a 110°C durante 24 horas de exposición.

3.9 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES ARCILLAS ANTE GEOPOLIMERIZACIÓN ALCALINA

En la campaña experimental GEO-E se analizó el comportamiento de diferentes tipos de arcilla: arcilla Tipo B, arcilla Tipo C y arcilla Tipo D (previamente caracterizadas en el apartado 3.5: Caracterización de las arcillas), frente a la acción de formulaciones y estrategias de polimerización ensayadas previamente en la arcilla Tipo A. El propósito de esta comparación fue identificar el grado de polimerización y el comportamiento de las diferentes arcillas, utilizando la resistencia a compresión como variable de respuesta.

Los detalles referentes a las diferentes formulaciones y los ensayos de resistencia a compresión de la campaña experimental GEO-E (GEO-E1, GEO-E2, GEO-E3, GEO-E4, GEO-E5, GEO-E6) se expone en los apartados 3.6.5, 3.7.5 y en los anexos respectivos. Para cada tipo de arcilla se probaron tres variables: activador alcalino a base de KOH con concentración molar de 10M y 14M con y sin adición de Na_2SiO_3 . El resto de factores que intervinieron en la polimerización de las arcillas fueron comunes en todos los casos (1,00 parte de arena, 0,3 partes de agua y una temperatura de 80°C durante 24 horas).

En la Figura 6.11.1 se observa el comportamiento a la resistencia a compresión que alcanzaron las muestras fabricadas con los diferentes tipos de arcilla ante la acción de KOH con una concentración molar de 10M con y sin adición de Na_2SiO_3 . Las muestras fabricadas con la arcilla Tipo B y Tipo C obtuvieron resistencias a compresión inferiores a 2,5MPa y las muestras fabricadas con la arcilla Tipo D obtuvieron resistencias a compresión próximas a 10MPa.

En la Figura 6.11.2 se observa la resistencia a compresión que alcanzaron las muestras fabricadas con los diferentes tipos de arcilla ante la acción de KOH con molaridad 14M con y sin adición de Na_2SiO_3 . Las muestras fabricadas con la arcilla Tipo B y Tipo C obtuvieron resistencias a compresión inferiores a 2,7MPa y las muestras fabricadas con la arcilla tipo D obtuvieron resistencias a

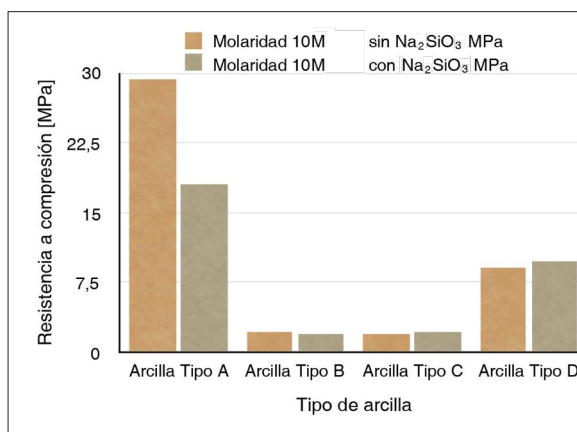


Fig. 6.11.1 Comparación del comportamiento mecánico de resistencia a compresión simple de diferentes tipos de arcilla ante acción de KOH - 10M con y sin adición de Na_2SiO_3 .

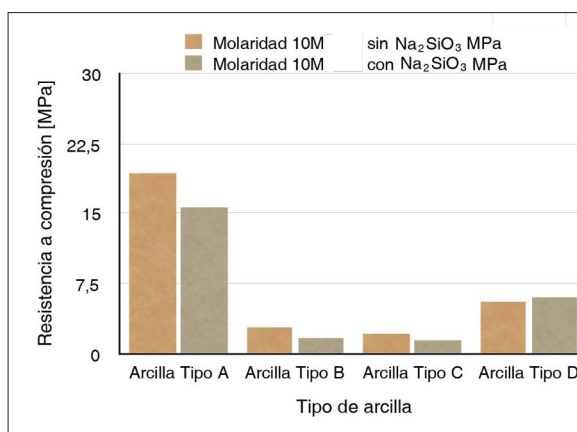


Fig. 6.11.2 Comparación del comportamiento mecánico de resistencia a compresión simple de diferentes tipos de arcilla ante acción de KOH - 14M con y sin adición de Na_2SiO_3 .

compresión próximas a 6MPa. Al comparar los resultados obtenidos con formulaciones similares en geo-polímeros a base de arcilla Tipo A se observó que las muestras fabricadas con la arcilla Tipo B y C fueron aproximadamente 10 veces menos resistentes, y las muestras fabricadas con la arcilla Tipo D fueron aproximadamente 3 veces menos resistentes.

La diferencia en los valores de resistencia a compresión que adquirieron las muestras según los diferentes tipos de arcillas utilizadas se asocia a varios factores estrechamente relacionados con sus características y composición. Así, es necesario hacer una distinción entre arcillas y minerales de arcilla. En primer lugar las arcillas (definidas por

su tamaño granulométrico) están formadas por diferentes minerales: cuarzo (Q), minerales de arcilla (Clay), feldespatos alcalinos potásicos (Fk), Calcio (Ca), Hematita (Hm) y otros minerales que en mayor y menor medida varían de una arcilla a otra. En segundo lugar los minerales de arcilla presentes varían en cantidad y tipo dominante pese a que todas poseen principalmente caolinitas, illitas, y cloritas.

En las muestras de arcilla Tipo A y D fue claramente identificable el alto porcentaje de caolinita (mineral de arcilla común de tipo estructural 1:1). La arcilla tipo A contiene 5,5 veces más caolinita que las muestras fabricadas con la arcilla Tipo B pero la mitad de caolinita contenida en la arcilla Tipo D. (Fig. 6.11.4, Fig. 6.11.5, Fig. 6.11.6, Fig. 6.11.7 respectivamente) En la arcilla Tipo B se encontraron arcillas cristalinas de tipo tres capas (2:1) con una estructura de láminas compuestas de dos capas de tetraedros de silicio y una capa central de octaedros de celosía expansiva equidimensional: se observó que existen cantidades pequeñas de calcita, plagioclasa, feldespato alcalino potásico, hematita, montmorillonita e Illita. La arcilla tipo C es similar a la arcilla Tipo B pero con proporciones diferentes. La arcilla Tipo D contiene la mayor proporción de caolinita, lo cual se puede observar en la Fig. 6.11.6 y en las caracterizaciones respectivas.

En menor cantidad se pudo encontrar minerales de arcilla de capas mixtas (apilamiento ordenado de capas alternativas de diferentes tipos) o tipos de estructura de cadena, cadenas similares al grupo de los anfíboles. Esta información se puede corroborar con los análisis DRX y FRX.

Por otra parte, la composición química de las arcillas desempeñó un rol clave en la polimerización (Capítulo 3: Geopolimerización y Geopolímeros a base de arcillas). La relación entre el contenido de silicio y aluminio, en este caso óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de silicio (SiO_2) fue determinante para la polimerización alcalina. La arcilla Tipo A guarda una relación (SiO_2/Al_2O_3) igual a 2,61; la arcilla Tipo B una relación igual a 3,48; la arcilla Tipo C una relación igual a 3,19; y la arcilla tipo D una relación igual a 1,82.

Esto explicó en gran medida el comportamiento mecánico de las muestras fabricadas a partir de las diferentes arcillas pero a la vez evidenció que no es el único factor a tomar en cuenta, ya que al contrario de lo que se esperaba, **las muestras fabricadas con la arcilla tipo D (con mayor cantidad de caolinita) presentaron una resistencia menor que las muestras fabricadas a partir de la arcilla tipo A y por lo tanto un menor grado de polimerización ante la formulación aplicada. Esta anomalía reveló que el resto de elementos presentes, tales como Fe_2O_3 , K_2O , TiO_2 , MgO , CaO , etc. desempeñaron un papel decisivo en la polimerización**, tomando en cuenta que las arcillas no fueron sometidas a deshidroxilación previa.

Otro factor importante que intervino en el comportamiento de las arcillas fue el tamaño de las partículas (Fig. 6.11.3, Fig. 6.11.4, Fig. 6.11.5, Fig. 6.11.6). **Las arcillas que presentaron menor tamaño de partícula y mayor superficie específica fueron más propensas a la activación alcalina.** Esto corrobora la información sobre el tamaño de partícula y área promedio de superficie específica (SSA) determinada por análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) con tres mediciones para cada muestra: $10,83\mu m - 1,27m^2/g$ para la arcilla Tipo A; $12,44\mu m - 1,03m^2/g$ para la arcilla Tipo B; $11,32\mu m - 1,06m^2/g$ para la arcilla Tipo C; $10,26\mu m - 1,04m^2/g$ para la arcilla tipo D (detalles en los apartados y anexos respectivos). Esto también se pudo apreciar en las diferentes imágenes que fueron capturadas por microscopía electrónica de barrido (SEM) y que permitieron divisar partículas microscópicas y macro nanométricas de los geopolímeros de arcillas Tipo A (Fig. 6.11.3); B (Fig. 6.11.4); C (Fig. 6.11.5); y D (Fig. 6.11.6). Los análisis DRX de geo-polímeros fabricados a partir de estas últimas tres arcillas (B, C y D) se exponen en el Anexo 6.12.1 - Análisis DRX de geo-polímeros GEO-E.

Como se observó, todas las partículas de tamaño arcilla, es decir partículas inferiores a $2\mu m$, contienen mayoritariamente cuarzo, pero también cantidades importantes de minerales de arcilla tipo dos capas (1:1) con una estructura de láminas compuestas de tetraedros de silicio y una capa de octaedros de alúmina, equidimensional (caolín).

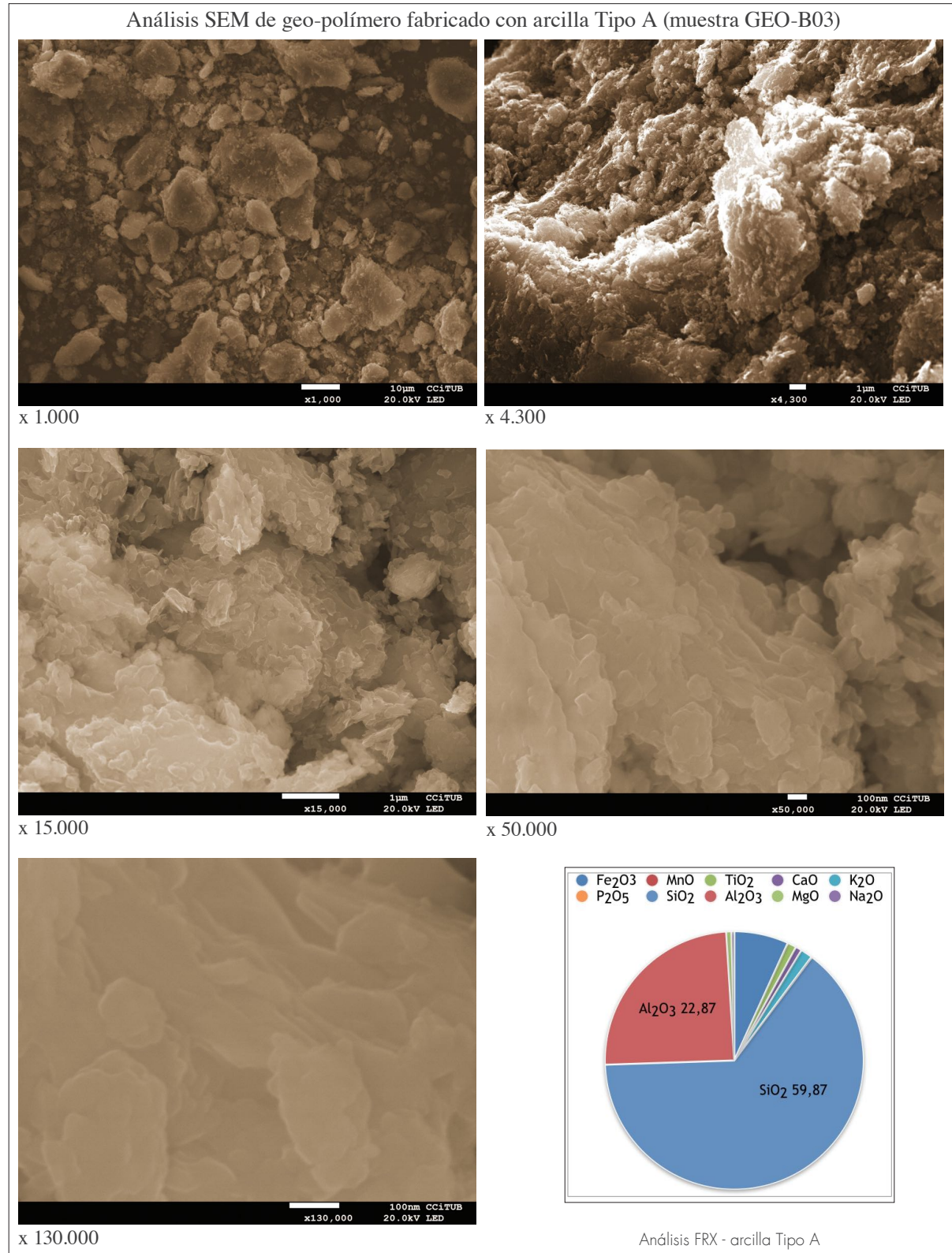


Fig. 6.11.3 Análisis SEM de muestra GEO-B03 fabricada a partir de la arcilla Tipo A (izquierda - interpretación de análisis FRX).

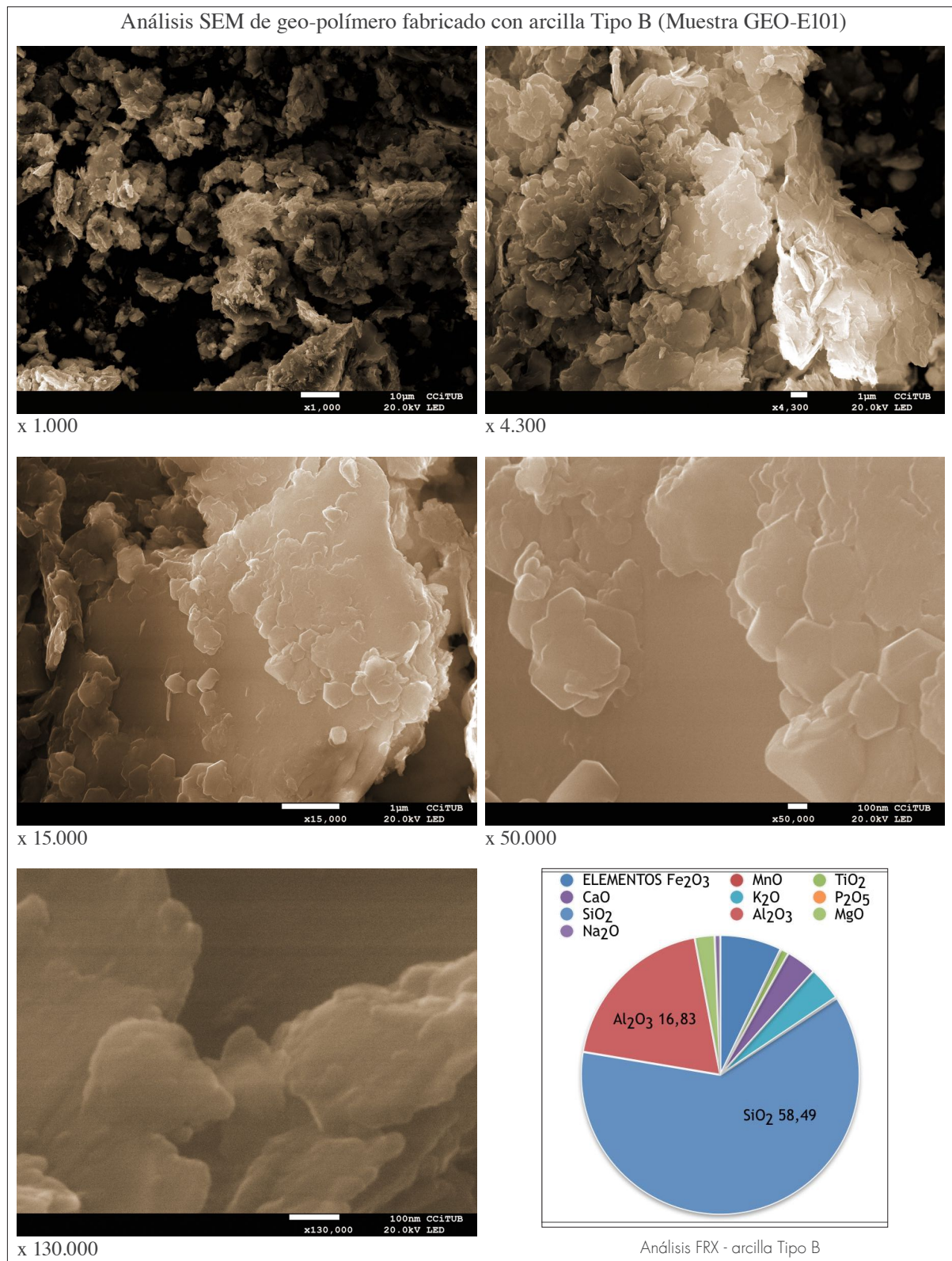


Fig. 6.11.4 Análisis SEM de muestra GEO-E101 fabricada a partir de la arcilla Tipo B (izquierda - interpretación de análisis FRX).

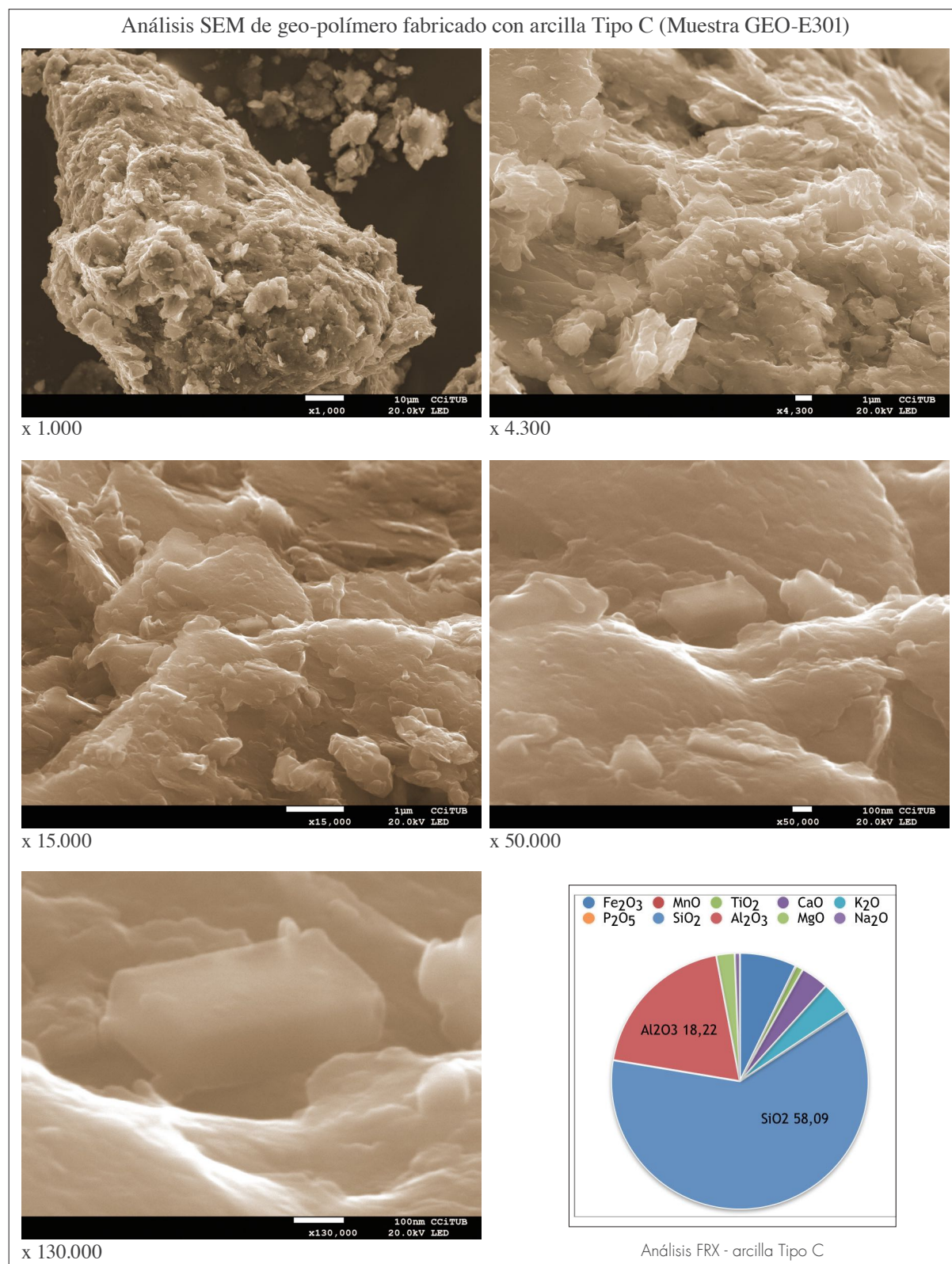


Fig. 6.11.5 Análisis SEM de muestra GEO-E301 fabricada a partir de la arcilla Tipo C (izquierda - interpretación de análisis FRX).

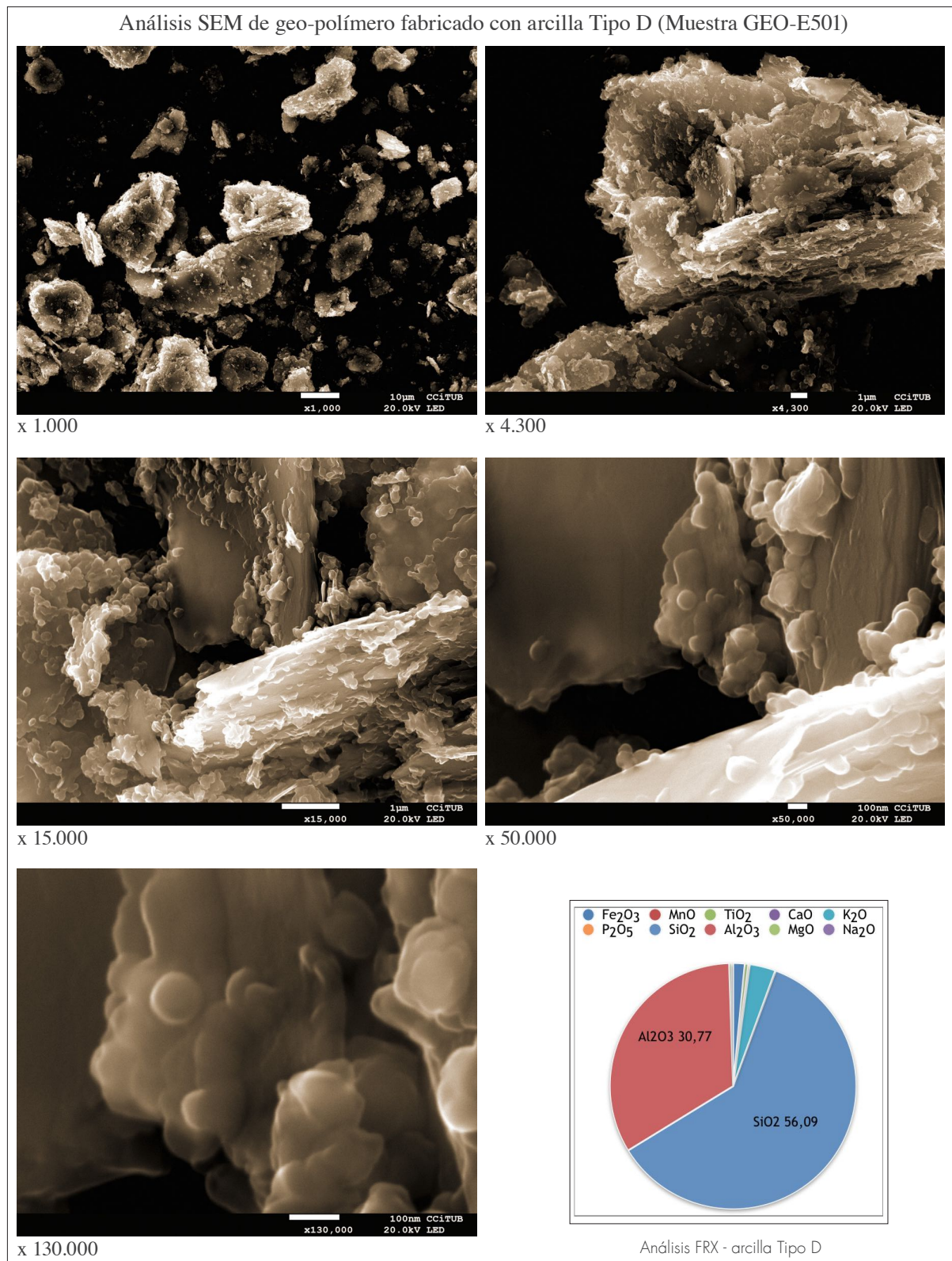


Fig. 6.11.6 Análisis SEM de muestra GEO-E501 fabricada a partir de la arcilla Tipo D (izquierda - interpretación de análisis FRX).

El caolín presente en todas las arcillas, no garantizó la polimerización de las muestras. Por tanto se concluyó que cada tipo de arcilla debe ser analizada y optimizada de acuerdo a todos sus componentes y características. En comparación con los geo-polímeros de arcilla Tipo A, se demostró que las arcillas con menor contenido de caolín (aluminosilicatos), como es el caso de la arcilla Tipo B y C; o mayor contenido de caolín (aluminosilicatos), como es el caso de la arcilla Tipo D, deben optimizarse mediante un proceso de análisis más exhaustivo que permita encontrar una formulación y un proceso de curado adecuado a cada caso. Esta podría ser una futura línea de investigación.

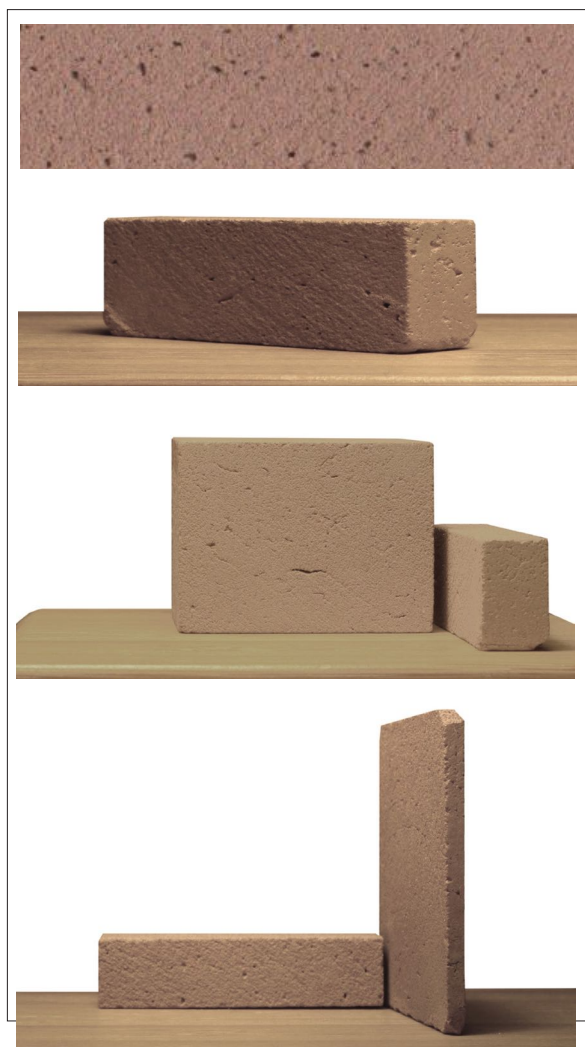


Fig. 6.11.7 Piezas de geopolímeros fabricados con arcilla Tipo A (Muestra GEO-B03) con una resistencia a la compresión de 29,3MPa.

3.10 ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS DE GEOPOLÍMEROS A BASE DE ARCILLA TIPO A

Se realizaron varios análisis de caracterización de los materiales polimerizados a partir de la arcilla Tipo A: Análisis por difracción de rayos X (DRX), Análisis termogravimétrico (ATG), Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM), Porosimetría de mercurio, Análisis complementarios de porosidad y densidad, Succión capilar, Permeabilidad al vapor de agua, Módulo de elasticidad dinámico (MOE), Determinación de durabilidad, Lixiviación, Comportamiento térmico y Comportamiento ambiental. Debido a los recursos destinados a esta investigación no se hicieron análisis a todas las muestras fabricadas. Dependiendo de cada uno de los análisis se seleccionaron muestras específicas con el propósito de comparar el efecto de las diferentes variables en el geopolímero resultante.

3.10.1 Composición: Análisis por difracción de rayos X (DRX)

Para el análisis por difracción de rayos X, por sus características resistentes, se seleccionaron tres muestras con diferentes activadores alcalinos: GEO-B01 (ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24) que contiene NaOH; GEO-B03 (ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24) que contiene KOH; y GEO-B07 (ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,09-CT80-H24) que contiene KOH con adición de Na_2SiO_3 (DRX en Fig. 6.12.1).

También se seleccionaron muestras que contenían "cal viva": GEO-D101 (ATA-A1-RA0,32-KM10-RC₄0,06-CT80-H24) expuesta a un curado a 80°C; GEO-D202 (ATA-A1-RA0,32-KM10-RC₄0,1); y POOX10-07 (ATA-A1-RA0,36-NM10-RB0,1-RC₄0,1) sin exposición a la estufa y curada en condiciones de laboratorio.

Debido a la extensión del estudio y a los límites fijados, todos los análisis DRX no son detallados en este apartado y se adjuntan como información disponible para consulta en el Anexo 6.12.1. De todos modos, los resultados de los análisis DRX evidenciaron altos contenidos de cristales de cuarzo y por tanto la presencia de SiO_2 . También mostraron que **los minerales de arcilla Tipo A, mediante los procesos de activación alcalina**

fueron policondensados en una sodalita hidratada o hidrosodalita tal como se ha señalado anteriormente por Heah, C. et. al. [1]. Estos geo-polímeros inorgánicos mostraron una composición química similar a la zeolita ($\text{Na}_{12} [\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$) tal como señala Dyer, A [2] con red estructural de poli (sialato) (Si-O-Al-O-) según la caracterización de Davidovits [3].

Tal como se puede apreciar más adelante en los análisis complementarios SEM (apartado 3.10.3), los geo-polímeros están compuestos de micro-estructuras conformadas por sólidos amorfos, en lugar de tener una línea cristalina completamente definida, lo cual también coincide con las observaciones de Heah, C. et. al. [4].

1 Heah, C. Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A. M., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., ... Liew, Y. M. (2012). *Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers*. Construction and Building Materials, 35, 912–922. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.102>.

2 Dyer, A., 1988. *An Introduction to Zeolite Molecular Sieves*. John Wiley & Sons, New York.

3 Davidovits, J. (1991). *Geopolymers - Inorganic polymeric new materials*. Journal of Thermal Analysis, 37(8), 1633–1656. <http://doi.org/10.1007/BF01912193>.

4 Heah, C. Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A. M., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., ... Liew, Y. M. (2012). op. cit.

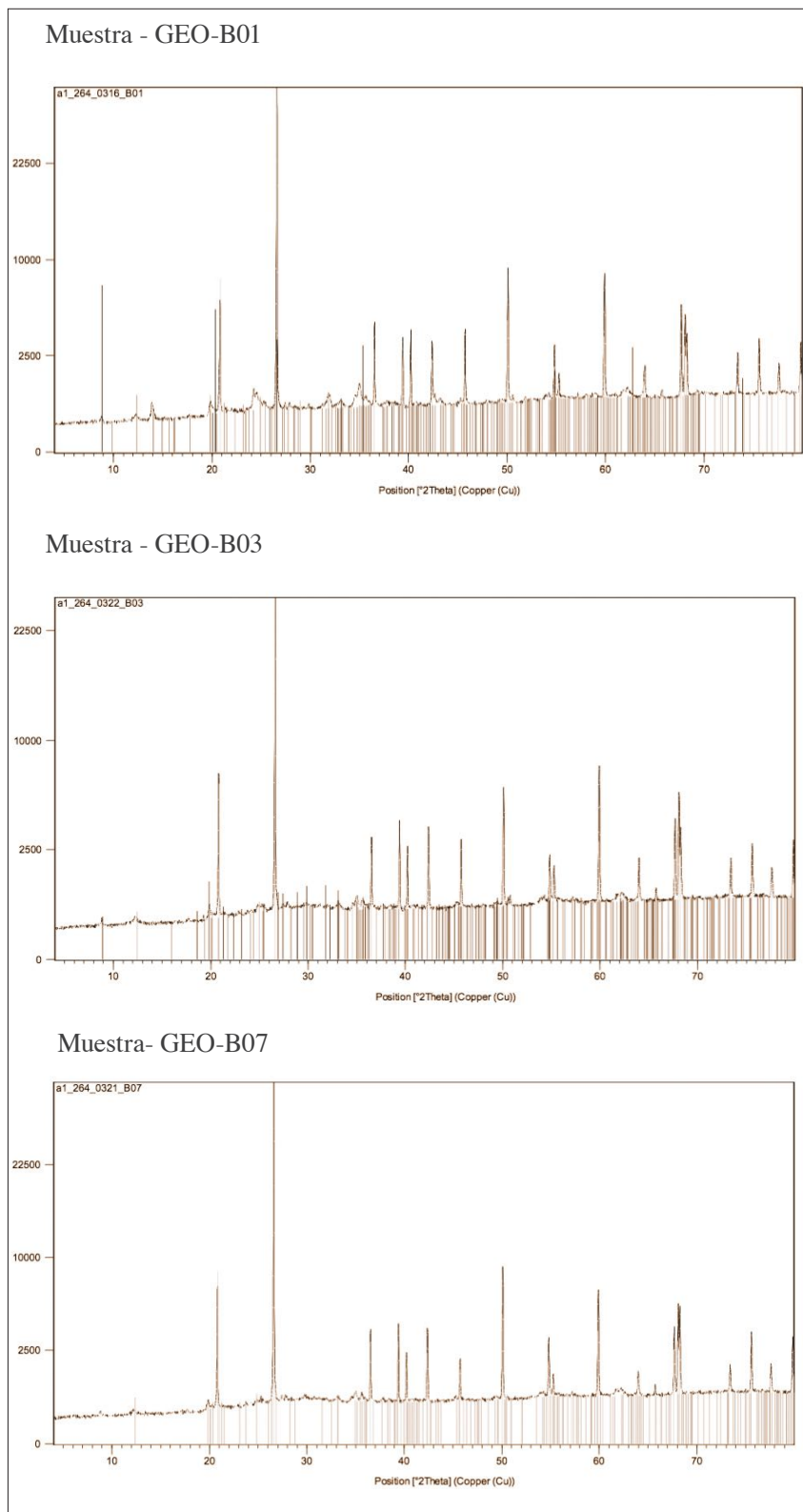


Fig. 6.12.1 Análisis DRX de geo-polímeros de arcilla GEO-B03, GEO-B05 y GEO-B07.

3.10.2 Análisis termogravimétrico (ATG)

Para el análisis termogravimétrico, debido a la limitación de recursos, se seleccionaron únicamente tres muestras de acuerdo a sus características resistentes para su comparación: GEO-B03 (ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24) que contiene KOH; GEO-B07 (ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,09-CT80-H24) que contiene KOH con adición de Na_2SiO_3 ; y GEO-D102 (ATA-A1-RA0,32-KM10-RC₄0,1-CT80-H24) que contiene "cal viva". El peso de la muestra analizada para GEO-B03, GEO-B07 y GEO-D102 fue de 26.68, 25.28 y 24.28mg respectivamente. El resultado obtenido mediante ATG en aire, así como la derivada de la pérdida de masa respecto a la temperatura (DTG), se muestra en cada gráfica. La señal DTG se empleó para establecer los rangos de temperatura en los que tienen lugar las transformaciones.

La zona gris delimitada por la línea negra representa la señal ATG y la línea negra discontinua la señal DTG del geo-polímero correspondiente a cada imagen. La línea roja continua representa la señal ATG y la línea roja discontinua la señal DTG de la arcilla Tipo A utilizada en todos los casos.

La pérdida de masa asociada a la deshidroxilación de caolinita presente en la arcilla Tipo A pudo compararse con el comportamiento de los geo-polímeros expuestos a ATG. En el gráfico ATG de la muestra GEO-B03 (Fig. 6.12.2.1) y GEO-D102 (Fig. 6.12.2.1) se observó una disminución de peso en comparación al comportamiento de las arcillas Tipo A debido al incremento de moléculas OH aportadas y liberadas por la solución alcalina. Luego de los 500°C se puede observar un desplazamiento de los picos más pronunciados, evidenciando que la caolinita contenida pasó a formar parte de la red estructural poli-sialato (Si-O-Al-O).

El comportamiento de la muestra Geo B07 (Fig. 6.12.2.2) se diferenció de las otras muestras principalmente por la adición de

Na_2SiO_3 . Debido a la extensión del estudio y a los límites fijados, todos los análisis ATG no son detallados en este apartado y se adjuntan como información disponible para consulta en el Anexo 6.12.2.

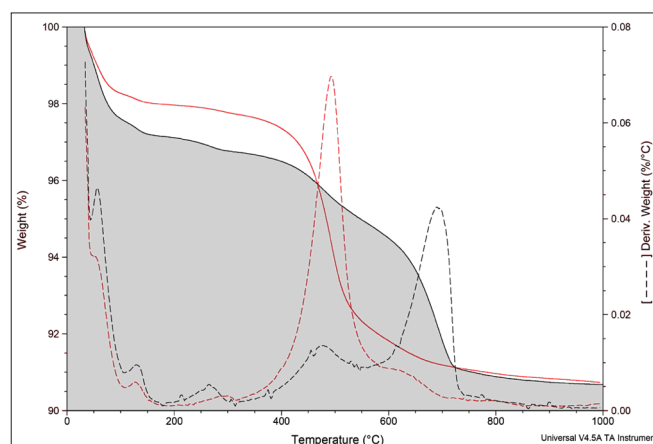


Fig. 6.12.2.1 Análisis ATG de muestra GEO-B03.

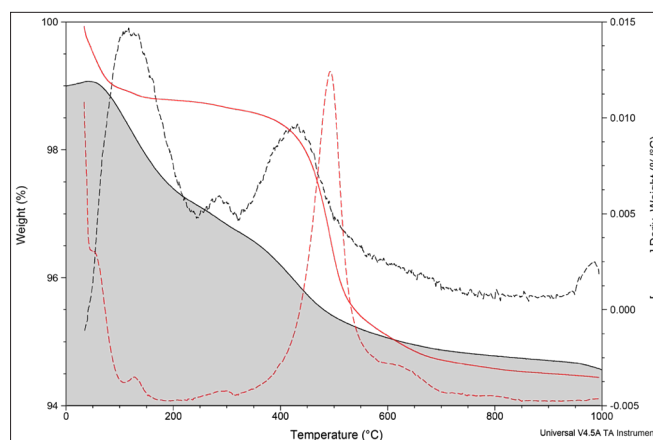


Fig. 6.12.2.2 Análisis ATG de muestra GEO-B07.

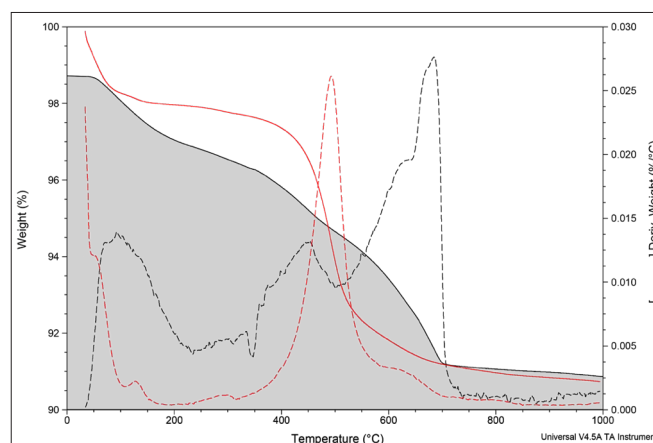


Fig. 6.12.2.3 Análisis ATG de muestra GEO-D0102.

3.10.3 Estructura: Análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se realizaron análisis por microscopía electrónica de barrido con el objetivo de observar la microestructura de los geopolímeros fabricados. Debido a la limitación de recursos, se seleccionaron tres muestras por sus características resistentes para su comparación: GEO-B01 (ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24) que contiene NaOH; GEO-B07 (ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,09-CT80-H24) que contiene KOH con adición de Na_2SiO_3 ; y GEO-D101 (ATA-A1-RA0,32-KM10-RC₄0,06-CT80-H24) que contiene "cal viva".

Se pudo observar a escala nanométrica redes semi amorfas producto de la reacción del activador alcalino y la temperatura de curado. También se pudo observar varias estructuras de grano suelto sin reaccionar como partículas de cristales de arcillas semi definidos adheridos unos a otros y a cristales de cuarzo formando nódulos alternados.

La polimerización de caolín reveló que las partículas que reaccionaron parcialmente coexisten con las partículas de caolín sin reaccionar. También se pueden distinguir pequeñas diferencias en las microestructuras entre los geo-polímeros activados con NaOH (Geo B01) y KOH (Geo B07; Geo D1-01) tal como se observan en las respectivas microscopías. NaOH actuó de mejor manera disolviendo las estructuras de aluminosilicatos presentes en el caolín y liberando Si^{4+} y Al^{3+} para dar lugar a la reacción de polimerización, lo cual se reflejó en un ligero incremento en el grado de enlace interlaminar.

Por otra parte, en las imágenes SEM de muestra GEO-D101 se evidenció que la adición de CaO (cal viva) afecta parcialmente la morfología de la red y estructura semiamorfa. Con adición de 0,06 de CaO y curado a 80°C durante 24h; la red micro estructural difiere ligeramente en comparación a las muestras sin adición de cal.

La macroestructura mostró superficies consolidadas pero a nivel microscópico se observaron micro poros distribuidos por todas partes en todas las muestras, corroborando los

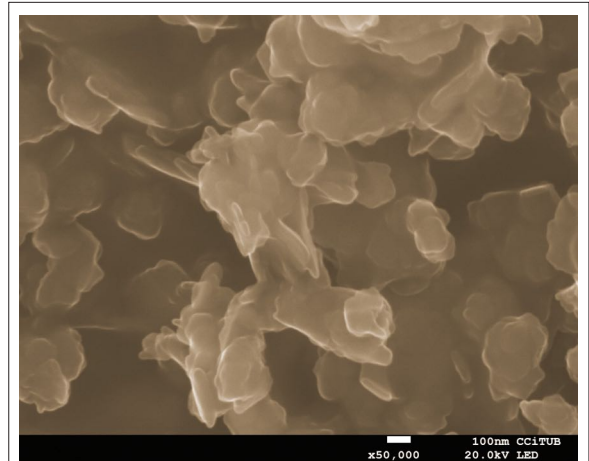


Imagen SEM - muestra GEO-B01

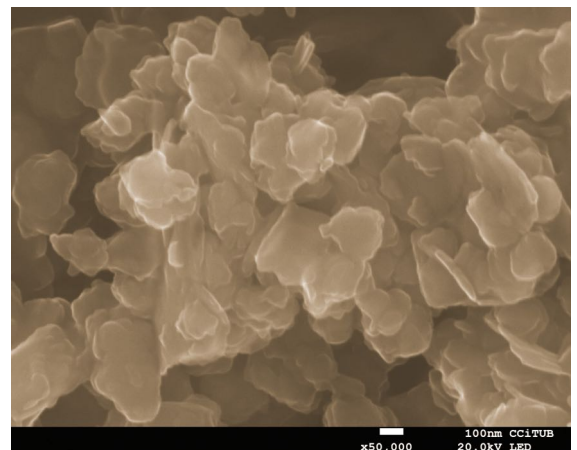


Imagen SEM - GEO-B07

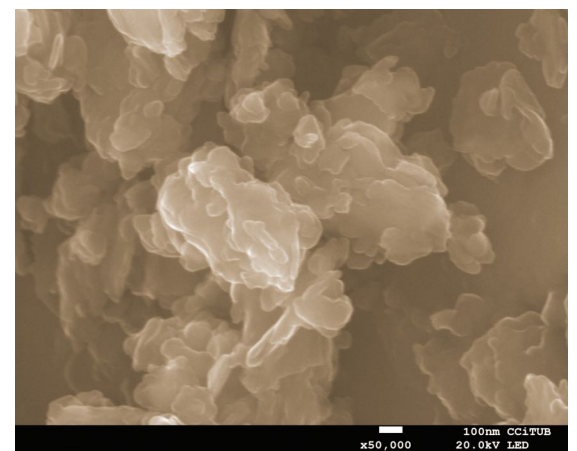


Imagen SEM - GEO-D101

Fig. 6.12.3 Imágenes de análisis por microscopía electrónica de barrido - SEM de geo-polímeros a base de arcilla Tipo A.

análisis de porosimetría de mercurio, densidad, succión capilar, permeabilidad al vapor de agua y módulo de elasticidad dinámico como se señala más adelante. Debido a la extensión del estudio y a los límites fijados, todos los análisis SEM realizados a diferentes escalas y los respectivos análisis cuantitativos de cada una de las muestras no son detallados en este apartado y se adjuntan como información disponible para consulta en el Anexo 6.12.3).

3.10.4 Estructura porosa - Porosimetría por inyección de mercurio

Para analizar el sistema macro y mesoporoso de los geo-polímeros de arcilla Tipo A se realizaron análisis de porosimetría por inyección de mercurio, descrito en el Anexo 4.0: Descripción de ensayos, Porosimetría de Mercurio. Debido a la limitación de recursos, se seleccionaron únicamente cuatro muestras de acuerdo a sus características resistentes y composición para su comparación: GEO-FP02 (ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24) que contiene NaOH; GEO-FP05 (ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,8-CT80-H24) que contiene Na_2SiO_3 ; GEO-D103 (ATA-A1-RA0,32-KM10-RC₄0,14-CT80-H24) que contiene "cal viva" (Fig. 6.12.4.2); GEO-D202 (ATA-A1-RA0,32-KM10-RC₄0,1) que fue curada en condiciones de laboratorio sin exposición a estufa.

Los resultados mostraron que el tamaño medio de los poros presentes en las muestras analizadas fueron de 0,07 a 0,16 μm lo que evidenció la microporosidad del material. Se observó que, dependiendo de la muestra, la densidad aparente fluctúa entre 1,83 y 1,93g/ml y la densidad aparente esquelética entre 2,02 y 2,24g/ml. La porosidad de las muestras osciló entre 8,62 y 17,84% dependiendo de la composición, con un factor de permeabilidad constante de 0,004. El resto de parámetros que definen el tipo de red porosa de los geo-polímeros de arcilla analizados, tanto de los datos de intrusión como de la estructura porosa, se recogen en la tabla de la Fig. 6.12.4.1. Los reportes completos y las gráficas de las curvas de distribución del volumen poroso e histogramas de frecuencia de cada muestra se encuentran en el Anexo 6.12.4.

Resultados de porosimetría mediante inyección de mercurio					
Resumen de datos de intrusión	Unidad	GEO-FP02	GEO-FP05	GEO-D103	GEO-D202
Total Intrusion Volume	mL/g	0,052	0,097	0,045	0,045
Total Pore Area	m ² /g	1,389	4,120	1,477	0,713
Median Pore Diameter (Volume)	μm	0,117	0,073	0,093	0,209
Median Pore Diameter (Area)	μm	0,100	0,063	0,077	0,165
Average Pore Diameter (4V/A)	μm	0,149	0,094	0,123	0,251
Bulk Density at 0.0018 MPa	g/mL	1,835	1,848	1,899	1,931
Apparent (skeletal) Density	g/mL	2,028	2,250	2,079	2,114
Porosity	%	9,512	17,847	8,622	8,652
Stem Volume Used	% ****	86,000	95,000	97,000	89,000
Resumen de la estructura porosa	Unidad	GEO-FP02	GEO-FP05	GEO-D103	GEO-D202
Threshold Pressure:	MPa	12,399	0,019	0,035	0,0488
Characteristic length	μm	0,101	65,052	35,337	25,554
Conductivity formation factor	-	0,044	0,011	0,008	0,009
Permeability constant	-	0,004	0,004	0,004	0,004
Permeability	mdarcy	0,002	212,492	45,010	25,643
BET Surface Area	m ² /g	230,000	230,000	230,000	230,000
Pore shape exponent	-	1,000	1,000	1,000	1,000
Tortuosity factor	-	0,000	2,158	0,000	0,000
Tortuosity	-	1699,344	5,912	10,743	13,372
Percolation Fractal dimension	-	2,997	2,750	2,986	2,998
Backbone Fractal dimension	-	N/A	2,877	2,947	2,927

Fig. 6.12.4.1 Resultados de porosimetría de mercurio. Detalles en el Anexo 6.12.4.



Fig. 6.12.4.2 Fotografía de la muestra GEO-D103 en la que se observan los macro poros del polímero a base de arcilla Tipo A.

3.10.5 Estructura porosa - Porosidad (método convencional)

El procedimiento de análisis se describe en el Anexo 4.0: Descripción de ensayos, Porosidad y densidad por método convencional. Debido a la limitación de recursos, se seleccionaron únicamente seis muestras de acuerdo a sus características resistentes y composición para su comparación y se encontraron valores que concuerdan con los obtenidos en el análisis de porosimetría por inyección de mercurio y análisis de absorción de agua por capilaridad. Los resultados evidenciaron que las muestras tienen una densidad aparente que oscila entre 1140,46 y 1661,85kg/m³ y una densidad real de 1874,58Kg/m³. La porosidad abierta fue de 14,86 a 26,25% según cada muestra. Los resultados se exponen en la Fig. 6.12.5 y son complementados por la información del ensayo de determinación de la absorción de agua por capilaridad y la permeabilidad al vapor de agua que se exponen a continuación.

Ensayo de porosidad y densidad - método convencional									
	Masa saturada	Peso hidrostático	Masa Seca	Vol. Poros abiertos	Vol. Aparente	Densidad aparente	Porosidad abierta	Absorción tras tiempo de inmersión	
Muestra	kg	kg	kg	m ³	m ³	Kg/m ³	%	%	
GEO-FP02	0,258	0,120	0,224	0,000034	0,000139	1613,46	24,69	15,26	
GEO-FP04	0,076	0,019	0,066	0,000011	0,000058	1140,10	18,15	15,87	
GEO-FP06	0,072	0,034	0,062	0,000010	0,000039	1606,44	26,25	16,29	
GEO-FP05	0,257	0,036	0,224	0,000033	0,000222	1009,85	14,86	14,67	
GEO-D101	0,101	0,047	0,087	0,000013	0,000054	1616,45	24,80	15,30	
GEO-D102	0,134	0,063	0,120	0,000015	0,000072	1661,85	20,61	12,37	
Media				0,000019	0,000097	1441,36	21,56	14,96	
Densidad Real									1874,58

Fig. 6.12.5 Resultados del ensayo para cálculo de porosidad.

3.10.6 Absorción de agua por capilaridad

El procedimiento de determinación de la absorción de agua por capilaridad se describe en el Anexo 4.0. Descripción de ensayos - Determinación de la absorción de agua por capilaridad.

Debido a la limitación de recursos se analizó únicamente la muestra GEO-FP07 (ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,8-CT80-H24) por su composición y características resistentes. El coeficiente de absorción capilar varió entre 5,2611 (Kg/m² √t) y 6,673 (Kg/m² √t) como se observa en la Fig. 6.12.6. Los valores tienen concordancia con los obtenidos en el análisis de porosimetría por inyección de mercurio evidenciando que el material posee una extensa red micro y mesoporosa que permite y facilita la absorción de agua. Los detalles y gráficos del ensayo de determinación de la absorción de agua por capilaridad se encuentran en el Anexo 6.12.6.

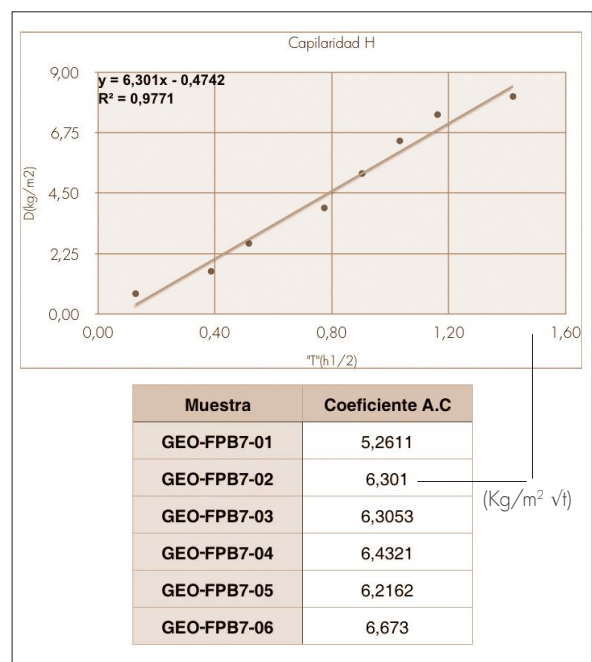


Fig. 6.12.6 Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad.

3.10.7 Permeabilidad al vapor de agua

El procedimiento de determinación de la permeabilidad al vapor de agua se encuentra en el Anexo 4.0: Descripción de ensayos, Permeabilidad al vapor de agua. Debido a la limitación de recursos se seleccionaron únicamente dos muestras de acuerdo a su composición y sus características resistentes para su comparación: GEO-FP02 (ATA-A1-RAO,3-NM10-CT80-H24) y GEO-FP05 (ATA-A1-RAO,3-NM10-RBO,8-CT80-H24).

En concordancia con el análisis de porosimetría por inyección de mercurio, los resultados de permeabilidad al vapor de agua confirmaron la estructura micro y mesoporosa del material, suficientemente denso para alcanzar resistencias mecánicas notables, manteniéndose permeable al vapor de agua.

Para la muestra GEO-FP02 los valores positivos del factor de resistencia al vapor de agua oscilaron entre 44,12 (μ) y 98,2 (μ) y los valores negativos entre 36,72 (μ) y 39,60 (μ). Para la muestra GEO-

FP05 los valores positivos del factor de resistencia al vapor de agua oscilaron entre 21,46 (μ) y 80,04 (μ) y los valores negativos entre 45,08 (μ) y 50,69 (μ). El resumen de valores se exponen en la tabla de la Fig. 6.12.7.

Los resultados variaron de una muestra a otra porque la red porosa no fue completamente uniforme en todas las probetas. Esto se debió principalmente al método de fabricación empleado. La mezcla no tuvo la suficiente fluidez para ser auto compactada y fue colocada en moldes manualmente sin compactación mecánica lo suficientemente regular y precisa para garantizar la homogeneidad de la red porosa del material en cada muestra. **La variación de resultados podría ser corregida en gran medida con procedimientos de fabricación tecnificados y controlados con exactitud.** De todos modos, los resultados de los ensayos evidenciaron la permeabilidad al vapor de agua y corroboran la información recolectada en los análisis precedentes. Los detalles del ensayo, datos de las condiciones ambientales y gráficos se encuentran en el Anexo 6.12.7.

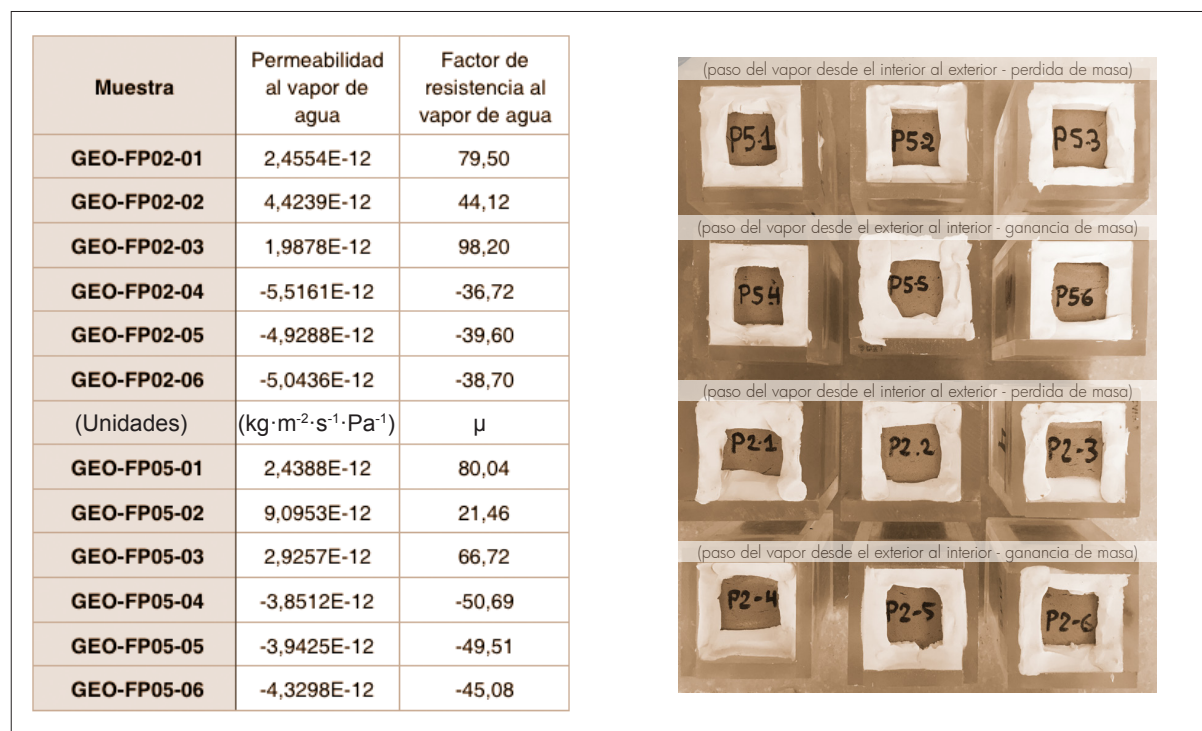


Fig. 6.12.7 Resultados del análisis de permeabilidad al vapor de agua.

3.10.8 Módulo de Young

El procedimiento que se aplicó para la determinación del módulo de Young se describe en el Anexo 4.0: Descripción de ensayos, Determinación de módulo de elasticidad dinámico MOE.

Debido a la limitación de recursos se seleccionaron únicamente seis muestras de la misma mezcla para la determinación del módulo de Young (MOE): GEO-FP02 (ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24), de acuerdo a su composición y sus características resistentes. Los valores del MOE longitudinal (GPa) variaron entre 2,368 y 2,692. Cuanto más denso era el material la propagación de las ondas fue más rápida presentando más rigidez. La Fig.6.12.8a resume los valores obtenidos. Esta variación se asocia con la fabricación manual de las probetas.

Los valores de los coeficientes de variación (C.V.) fueron inferiores al 5% lo cual acreditó la homogeneidad de las probetas. Todos los valores detallados y los datos de valores de error se pueden observar en las tablas del Anexo 6.12.8. La extensa red micro y mesoporosa del material influyó en el comportamiento de las muestras. En

comparación al módulo de Young de materiales como el bloque de hormigón (12-18 GPa), ladrillos cerámicos (10-50 GPa), hormigón común a base de cemento Portland (15-25 GPa), los bloques de polímero Geo FPA02 fabricados a base de arcilla Tipo A presentaron valores aproximados a 13 GPa (MOE_{flex} Fig. 6.9.12b).

La determinación del módulo de elasticidad dinámico, a más de dar a conocer aspectos referidos a la elasticidad y rigidez del material, nos permitió intuir las propiedades acústicas inherentes a la velocidad de paso de ondas acústicas por impacto (valores expuestos en el Anexo 6.12.8). De este modo se observó que el material experimental fabricado a base de arcilla polimerizada presenta características acústicas absorbentes gracias a su red micro y mesoporosa y a su densidad. Esta característica puede resultar interesante a la hora de seleccionar materiales de construcción y puede ser objeto de estudios futuros.

3.10.9 Durabilidad

La determinación de la durabilidad se llevó a cabo mediante la aplicación de la norma UNE41410:2088, sección que hace referencia al ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET), tal como se describe en el Anexo 4.0: Descripción de ensayos, Determinación de la durabilidad mediante ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET).

Los bloques GEO-FP01 y GEO FP02 fueron ensayados conforme a la norma y se clasificaron como aptos según el criterio detallado en el apartado 5.8 de la misma. La profundidad de

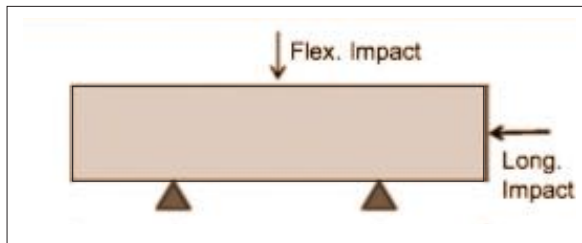


Fig. 6.12.8b Esquema que indica la cara de impacto correspondiente al valor MOE_{flex} y MOE_{long} .

Resultados Módulo de elasticidad dinámico MOE				
Muestra	Velocidad de paso long. (m/s)	MOE_{flex} . cara 1 (GPa)	MOE_{flex} . cara 2 (GPa)	MOE long. (GPa)
GEO-FP02-01	1193,95	13,98	14,62	2,69
GEO-FP02-02	1160,61	13,49	14,38	2,55
GEO-FP02-03	1161,38	13,39	14,29	2,37
GEO-FP02-04	1178,45	13,45	14,35	2,60
GEO-FP02-05	1122,55	12,09	13,11	2,40
GEO-FP02-06	1183,81	13,51	14,03	2,63

Fig. 6.12.8a Resultados del análisis de determinación del Módulo de Young (MOE).

la oquedad producida por el goteo de agua no superó en ningún caso los 10mm.

Por otra parte, los bloques señalados se sometieron a inmersión total durante seis meses con el propósito de observar la estabilidad del material. A simple vista, la inmersión en agua destilada no provocó la disolución de la arcilla y los bloques mostraron uniformidad conservándose formalmente consolidados. Esto es interesante debido a la gran preocupación que se ha generado en torno a la inestabilidad de los materiales de arcilla cruda ante el efecto del agua y los entornos húmedos.

Mediante estos ensayos se observó que los bloques de arcilla polimerizada presentan cualidades importantes de durabilidad frente al

agua en comparación a cualquier material de arcilla cruda.

3.10.10 Lixiviación

El procedimiento seguido para el análisis de lixiviación se describe en el Anexo 4.0: Descripción de ensayos, Análisis de lixiviación. Los resultados obtenidos se pueden observar en las tablas de la Fig. 6.12.10.

Debido a la limitación de recursos se seleccionaron únicamente cinco muestras de acuerdo a su composición y sus características resistentes: GEO-FP04 (ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24); GEO-FP06(ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,8-CT80-H24);

Muestra	Área de lixiviación (cm ²)	Volumen lixivante (mL)	pH	Conductividad (µS/cm)	EN FUNCIÓN DE ÁREA DE LIXIVIACIÓN Y DE VOLUMEN DE LIXIVIANTE		EN FUNCIÓN DE ÁREA DE LIXIVIACIÓN	
					Conductividad (µS/cm·mL)	Cloruros (mg/L)	Cloruros (mg/cm ²)	
GEO-FP04 (P4)	64	512	10,740	3070	0,094	3,277	0,026	
GEO-FP06 (P6)	72	576	11,860	5010	0,121	6,406	0,051	
GEO-D101 (D1-1)	80	640	12,200	5930	0,116	4,294	0,034	
GEO-D102 (D1-2)	80	640	12,360	7360	0,144	4,810	0,038	
P00X10-07 (X10)	80	640	11,370	2850	0,056	4,376	0,035	

Metales (mg/L)						En función del área de lixiviación (mg/cm ²)				
	X10	P6	P4	D1-1	D1-2	X10	P6	P4	D1-1	D1-2
Ca	0,87	1,07	1,16	1,97	1,12	0,00076		0,00039		0,00042
Mg	<0,10	0,47	0,13	<0,10	<0,10	<0,0008		0,00004	<0,0008	<0,0008
Ba	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00001		0,00001		0,00000
Cd	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,15	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012	<0,0012
Co	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	<0,0024	<0,0024	<0,0024	<0,0024	<0,0024
Cu	<0,01	0,02	0,01	<0,01	<0,01	<0,00008		0,00000	<0,00008	<0,00008
Mn	<0,005	0,02	0,01	<0,005	<0,005	<0,00004		0,00000	<0,00004	<0,00004
Pb	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,0016	<0,0016	<0,0016	<0,0016	<0,0016
Sr	<0,005	0,03	0,01	<0,005	<0,005	<0,00004		0,00000	<0,00004	<0,00004
Zn	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	<0,00016		<0,00016	<0,00016	<0,00016
K	2,49	5,17	10,74	1308,75	1610,03	0,00215		0,00359		0,60056
Al	4,90	1,19	0,53	63,62	56,64	0,00424		0,00018		0,02113
Be	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008
Fe	0,10	3,41	0,59	0,12	0,11	0,00009		0,00020		0,00004
Li	0,11	<0,10	0,13	<0,10	<0,10	0,00010	<0,0008	0,00004	<0,0008	<0,0008
Mo	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008
Ni	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008
Sb	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008
Ti	<0,02	0,05	0,02	<0,02	<0,02	<0,00016		0,00001	<0,00016	<0,00016
Tl	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008	<0,0008
V	0,18	0,69	0,58	0,46	0,35	0,00016		0,00019		0,00013
Na	538,61	987,41	673,99	10,64	10,74	0,46600		0,22542		0,00401
As	0,75	0,87	1,32	<0,50	0,54	0,00065		0,00044	<0,004	0,00020
B	<0,20	<0,20	<0,20	0,32	0,35	<0,0016	<0,0016	<0,0016		0,00013
Cr	0,03	0,07	0,05	0,24	0,20	0,00003		0,00002		0,00007
P	0,25	0,49	0,26	0,71	0,32	0,00022		0,00009		0,00012
S	2,30	<0,50	0,76	26,85	29,65	0,00199	<0,004	0,00025		0,01106
Se	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Si	19,52	493,49	62,78	29,88	29,78	0,01689		0,02100		0,01111

Fig. 6.12.10 Resultados del análisis de comportamiento durante la lixiviación para la caracterización básica.

GEO-D101(ATA-A1-RA0,32-KM10-RC₄0,6-CT80-H24); GEO-D102 (ATA-A1-RA0,32-KM10-RC₄0,06); P00X10-07 (ATA-A1-RA0,36-NM10-RB0,10-RC₄0,1). La porosidad del material contribuyó a la lixiviación de elementos. Como se esperaba, se observó concentraciones de sodio (Na) en las muestras fabricadas con NaOH: P00X10-07, GEO-FP06, GEO-FP04; y potasio (K) en las muestras fabricadas con KOH: GEO-D101 y GEO-D202. Estas dos últimas muestras, que fueron fabricadas con la adición de CaO o "cal viva", también lixiviaron una importante cantidad de azufre (S).

En las muestras P00X10-07, GEO-FP04 y GEO-FP06 se encontraron pequeñas cantidades de aluminio (Al) mientras que en las muestras GEO-D101 y GEO-D102 la cantidad de aluminio fue mayor. De este fenómeno **se pudo deducir que el aluminio lixiviado corresponde al aluminio estructural de la arcilla que no participó en el proceso de polimerización, por lo que se concluyó que existe una mejor polimerización mediante el uso de NaOH que con KOH como activador alcalino.** Esto también se corroboró con el hecho de que las cantidades de K encontradas luego del ensayo de lixiviación fueron mayores a las cantidades de Na.

3.10.11 Comportamiento térmico

El procedimiento realizado para el análisis del comportamiento térmico se detalla en el Anexo 4.0: Descripción de ensayos, Análisis del comportamiento térmico.

El propósito de este ensayo fue determinar el valor

Muestra A					
GEO-FP01	Unidades	Muestra A1	Muestra A2	Muestra A3	TOTAL
λ = Conductividad	W/m.k	0.6420	0.6190	0.6090	0.6233
cp:	E+6 J.m3k	1.5600	1.6000	1.5800	1.5800
α : = Difusividad	E-6 m2/s	0.4110	0.3880	0.3840	0.3943

Muestra B					
GEO-FP05	Unidades	Muestra A1	Muestra A2	Muestra A3	TOTAL
λ = Conductividad	W/m.k	1.0300	1.1500	1.0200	1.0667
cp:	E+6 J.m3k	1.6500	1.6400	1.4700	1.5867
α : = Difusividad	E-6 m2/s	0.6210	0.7000	0.6980	0.6730

Fig. 6.12.11 Resultados del análisis de comportamiento térmico.

λ [lambda (W/m.K)] como un referente aproximado que nos permita intuir el comportamiento del material aplicado como cerramiento en la construcción. Debido a la limitación de recursos se seleccionó únicamente dos muestras de acuerdo a su composición y sus características resistentes: GEO-FP01 y GEO-FP05. Las probetas mostraron valores de conductividad que oscilaron entre 0,6233 (W/m.K) y 1,0667 (W/m.K) como se observa en la Fig. 6.12.11.

Al comparar valores de conductividad térmica λ (W/m.K) de materiales comunes de construcción como: bloque de hormigón (0,7 - 0,8 W/m.K), ladrillo cerámico común (0,4-0,8 W/m.K) y hormigón a base de cemento Portland (0,7 - 2,6 W/m.K), **se pudo observar que los bloques experimentales de arcilla polimerizada Tipo A mostraron un comportamiento térmico similar al del ladrillo común.** Esto se debió a la red micro y mesoporosa del material que fue expuesta en el apartado de análisis de porosimetría de mercurio.

3.11 ANALISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL

La investigación y el análisis del comportamiento ambiental de los bloques experimentales de arcilla polimerizada desarrollados en esta tesis, fue un trabajo de co-autoría con J.R. Rosell del *Departament de Tecnologia de l'Arquitectura de la Universitat Politècnica de Catalunya*; A. Torres-Rivas y M. Palumbo del *Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Rovira i Virgili*; y D. Boer del *Departament d'Enginyeria Mecànica de la Universitat Rovira i Virgili*. La investigación realizada está detallada en el artículo: "Compressive strength and embodied environmental impact of experimental polymerized-clay brick" adjuntado en el apartado: Anexo 1.0.

El impacto ambiental incorporado de los bloques experimentales de arcilla polimerizada se evaluó utilizando la metodología de evaluación del ciclo de vida (ACV). El objetivo del ACV fue doble. Primero, evaluar qué combinación de las composiciones y procesos de producción probados en el laboratorio, mostraron simultáneamente un mejor desempeño ambiental y mecánico. En segundo lugar, evaluar los impactos ambientales asociados a

la producción de bloques experimentales de arcilla polimerizada en comparación con productos de construcción fabricados a partir de arcilla: ladrillos de arcilla cocida y bloques de tierra comprimida (BTC). Por lo tanto, el alcance del análisis de ACV se limitó al proceso de producción, teniendo en cuenta los impactos asociados con las materias primas utilizadas en cada caso y la energía consumida durante el proceso de producción.

La energía consumida durante el proceso de producción se estimó bajo la hipótesis de que los ladrillos experimentales se fabricaron a escala industrial. Se utilizó la base de datos Ecoinvent 3.4 para determinar los impactos ambientales asociados de cada materia prima y los procesos de producción.

Los resultados obtenidos se expresaron utilizando el método de ponderación ReCiPe (puntos finales). Para lograr el primer objetivo, se evaluaron los impactos ambientales (puntos) y las resistencias a la compresión (MPa) de las muestras.

Para el segundo objetivo del ACV, se compararon los impactos ambientales asociados con la producción de los materiales comparados. En el caso de las BTC, solo se consideró el impacto asociado con las materias primas, ya que su proceso de producción no implica el uso calor.

El objetivo de este análisis fue doble: primero evaluar el impacto ambiental incorporado en relación a la

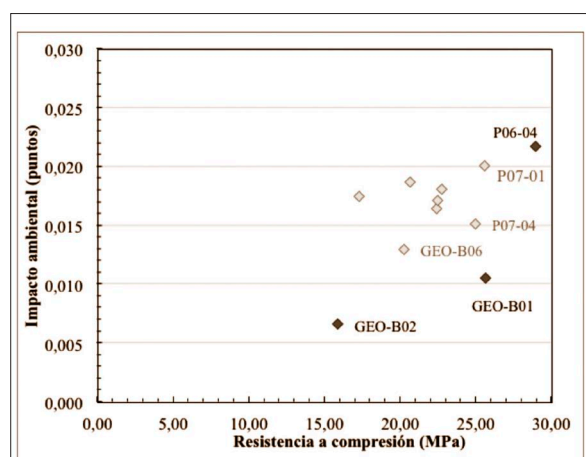


Fig. 6.13.1 Comparación del impacto ambiental en relación a la resistencia a compresión de las diferentes muestras analizadas.

resistencia a compresión simple de los bloques de experimentales de arcilla polimerizada; y segundo comparar los resultados obtenidos con materiales similares de construcción: ladrillos de arcilla cocida y bloques de tierra comprimida (BTC).

En el análisis ambiental se analizaron: los bloques de la campaña experimental GEO-A cuyo diseño experimental se detalla en el apartado 3.6.1 y los ensayos de resistencia mecánica en el apartado 3.7.1; los bloques de la campaña experimental GEO-B cuyo diseño experimental se detalla en el apartado 3.6.2 y los ensayos de resistencia mecánica en el apartado 3.7.2; y los bloques de la campañas experimentales P05, Geo P06 y P07 cuyo diseño experimental se detalla en el apartado 3.6.7 y los ensayos de resistencia mecánica en el apartado 3.7.6.

3.11.1 Análisis del comportamiento ambiental de los bloques de arcilla polimerizada

Los resultados del análisis del comportamiento ambiental de de los bloques de arcilla polimerizada se presentan en el gráfico de la Fig. 6.13.1. Las diversas mezclas y métodos de fabricación que se incluyeron en el análisis se compararon en cuanto a su impacto ambiental (eje y) y resistencia a la compresión (eje x). Los resultados se presentan utilizando los puntos totales del método de ponderación ReCiPe para facilitar la comparación [1]. Las formulaciones óptimas, es decir, aquellas formulaciones a partir de las cuales no es posible mejorar uno de los parámetros sin empeorar uno de los otros dos, constituyen la frontera de Pareto. Estas se resaltan utilizando marcadores más oscuros en el gráfico de la Fig. 6.13.1.

Se encontró que 3 formulaciones experimentales son óptimas (marcas más oscuras en la Fig. 6.13.1). El impacto ambiental que se toma en cuenta incluye

1 El análisis de impacto ambiental fue realizado por A. Torres-Rivas y M. Palumbo del Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Rovira i Virgili; y D. Boer del Departament d'Enginyeria Mecànica de la Universitat Rovira i Virgili. La investigación realizada está detallada en el artículo: "Compressive strength and embodied environmental impact of experimental polymerized-clay brick" adjuntado en el apartado: Anexo 1.0.

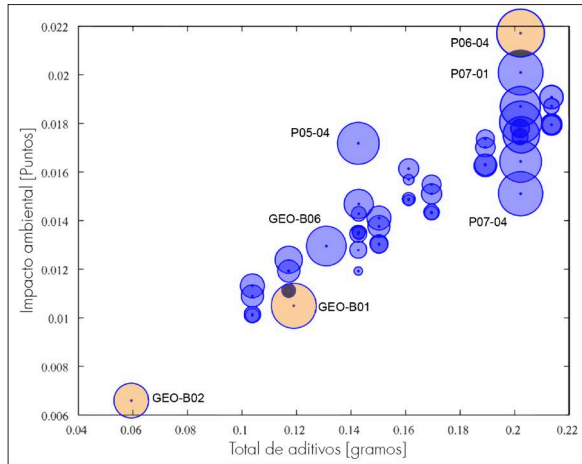


Fig. 6.13.2 Efecto de la dosificación de aditivos sobre el impacto ambiental.

dos fuentes principales: el impacto incorporado de las materias primas y el impacto del uso de energía durante la fabricación. Se encontró que el primero era más significativo que el último, siendo la mayor parte del impacto debido a los aditivos utilizados (NaOH y Na_2SiO_3).

De las soluciones óptimas, GEO-B02 es la muestra que presenta el menor impacto ambiental, ya que se produce a 80°C e incorpora bajas cantidades de NaOH (3% de peso seco). Sin embargo, también es la muestra en la frontera de Pareto con menor resistencia a la compresión (15.9 MPa). GEO-B01 es la muestra que tiene un rendimiento más equilibrado, ya que su impacto ambiental sigue siendo bajo y su resistencia a la compresión es de 25.8MPa, lo que es más alto que el promedio de ladrillos cerámicos.

La muestra P06-04 es la que tiene la mayor resistencia a la compresión (29MPa) y también el mayor impacto ambiental. Con respecto a GEO-B01, la resistencia a la compresión se incrementa en un 11% y el impacto ambiental en un 52%. Las principales diferencias en el proceso de producción entre las muestras GEO-B01 y P06-04 fueron la adición de Na_2SiO_3 en la mezcla y el cambio de temperatura de curado de 80°C a 110°C .

Los resultados muestran que la mejora de las propiedades mecánicas no está vinculada con un

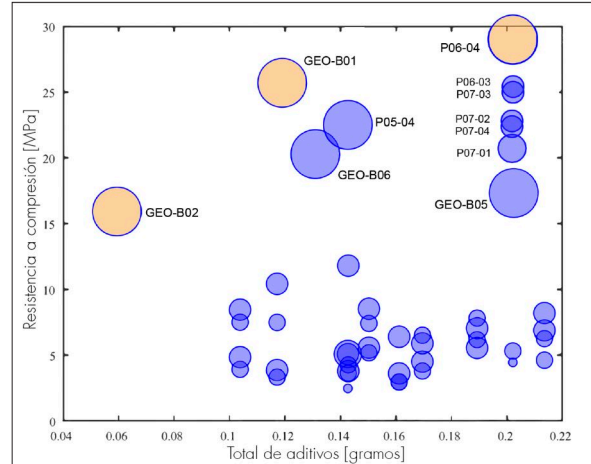


Fig. 6.13.3 Efecto de la dosificación de aditivos sobre la resistencia a la compresión.

aumento del impacto ambiental incorporado, lo que demuestra el interés en integrar el análisis de ACV desde las etapas iniciales en el diseño del material.

En la Fig. 6.13.2, se exponen las formulaciones de los bloques de arcilla polimerizada de acuerdo su contenido de aditivos (eje X) y a su energía incorporada (eje y). El tamaño de las burbujas corresponde a la resistencia a la compresión; Las soluciones óptimas se destacan en naranja. Los resultados muestran que la energía incorporada depende en gran medida del contenido de aditivos.

Es notable que dos de las soluciones óptimas (GEO-B02 y P06-04) sean soluciones extremas, con el contenido más bajo y más alto de aditivos y el impacto ambiental más bajo y más alto, respectivamente. Esto revela el rol que desempeñan los aditivos en el impacto ambiental de las muestras.

En la Fig. 6.13.3 se compara la cantidad total de aditivos (eje x) con la resistencia a la compresión (eje y). El tamaño de las burbujas corresponde al tiempo de curado: parámetro que se encontró que tuvo una influencia significativa en los resultados. Las muestras se dividen en dos grupos: las burbujas más pequeñas representan las muestras curadas durante 2, 4 y 7 horas y corresponden a las muestras con resistencias a la compresión inferiores a 15MPa. Estas caen en la parte inferior

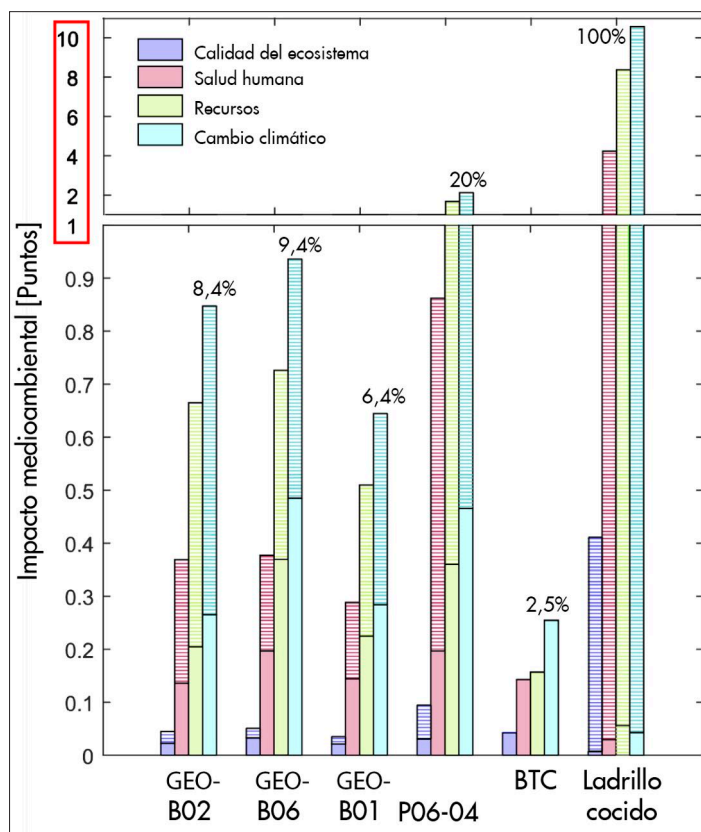


Fig. 6.13.4 Impacto ambiental de un muro macizo que soporta 200 kg/mL.

del gráfico. Las burbujas más grandes, que son las que se curan durante 24 horas, se ubican en la parte superior del gráfico (> 15MPa). Todas las soluciones óptimas están en este segundo grupo. Solo cinco muestras curadas a menos de 24 horas mostraron una buena resistencia a la compresión (P07-01 a P07-04 y P06-03). Esto se debe al menor contenido de agua de estas muestras.

3.11.2 Comparación con productos de construcción similares

Las mezclas y los métodos de fabricación óptimos se compararon con productos de construcción similares en el mercado por ser fabricadas a base de arcilla, es decir, un ladrillo cerámico promedio y un bloque de tierra comprimida (BTC). Para esta comparación, la unidad funcional se normalizó con la resistencia a la compresión para comparar el impacto de las unidades del material que ofrecen el mismo rendimiento (es decir el impacto ambiental de un muro macizo que soporta 200

kg/mL).

En los resultados que se muestran en la Fig. 6.13.4, el impacto ambiental (eje y) se divide en cuatro categorías: salud humana, ecosistema, agotamiento de recursos y cambio climático (con respecto a puntos finales de ReCiPe). Para cada categoría, se distinguen los impactos correspondientes a las materias primas (barras rayadas) y al consumo de energía durante la fabricación (barras sólidas).

Por unidad funcional el bloque de tierra comprimida (BTC) fue la mejor opción ambiental. Sin embargo, la resistencia mecánica notablemente más baja, implicaría muros de gran espesor que representarían un problema en lugares en donde se necesita optimizar el área de construcción y/o soportar grandes cargas. **El impacto ambiental de ladrillos cocidos es el más alto. Por lo tanto, cualquiera de las formulaciones óptimas de los bloques de arcilla geo-polimerizada sería una mejor opción que el ladrillo cerámico común.**

Conclusiones

CAPÍTULO 4



Fig. 7.1 En la arquitectura del futuro los geo-polímeros de arcilla podrían constituir una alternativa a materiales de construcción que incorporan gran cantidad de energía.

“Todo material, independientemente de que sea natural o sintético, posee propiedades específicas, que se han de conocer para poder trabajar con ellos. Los nuevos materiales y métodos de construcción no aseguran por sí solos una superioridad. Lo decisivo es saber emplearlos correctamente. Un material sólo vale aquello que sabemos hacer con él.”

Mies van der Rohe (1965) [1] Texto extraído de: “Directrices para la enseñanza de la arquitectura” Recuperado de: Neumeyer, Fritz. Mies van der Rohe. La palabra sin artificio: reflexiones sobre arquitectura 1922/1968. 1a. ed. Madrid: El Croquis, 1995. p.507.

4. CONCLUSIONES

Los estudios de nuevos horizontes y procedimientos de optimización de las características de materiales de construcción que no incorporen gran cantidad de energía, y cumplan las demandas de la arquitectura y la construcción moderna, son actualmente pertinentes.

La investigación llevada a cabo, que partió del interés por los materiales de construcción a base de arcilla y su potencial para reducir el impacto ambiental, tuvo como reto principal ir más allá de los estudios sobre técnicas de estabilización convencional que no han dado respuestas coherentes a los requerimientos modernos de la arquitectura. Esta investigación aporta los resultados de procedimientos experimentales que, mediante el uso de técnicas de geopolimerización, incrementan

la resistencia mecánica de los materiales de arcilla y cubre un vacío de conocimiento al presentar resultados de estimaciones del consumo energético e impacto ambiental de su producción.

Esta investigación da respuesta a la hipótesis planteada y cumple los objetivos al demostrar que los principios de geopolimerización pueden ser aplicados a la fabricación de materiales de arcilla natural, incrementando su desempeño mecánico y manteniendo niveles más bajos de impacto ambiental que los ladrillos de arcilla cocida.

A continuación se exponen las conclusiones siguiendo el orden de los objetivos planteados al inicio del estudio.

4.1 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE GEOPOLÍMEROS DE ARCILLAS EN FUNCIÓN A SU RESISTENCIA MECÁNICA

La campaña experimental permitió analizar el comportamiento de los materiales precursores, los procedimientos de fabricación, y las características de los materiales de arcilla geo-polimerizada. A continuación se exponen las conclusiones respectivas.

• Sobre la resistencia mecánica

Los bloques experimentales de arcilla Tipo A alcanzaron prestaciones mecánicas superiores a la de los ladrillos cerámicos comunes con formulaciones y métodos de fabricación análogos a la geopolimerización. Así, muestras optimizadas obtuvieron valores que oscilaron entre 20 y 30MPa de resistencia a compresión y entre 3 y 9MPa de resistencia a flexotracción. Adicionalmente en pruebas piloto se observó que la adición de defloculantes (fluidificantes de hormigón) incrementó aún más la resistencia del material, obteniendo valores que alcanzaron 35MPa de resistencia a compresión y 11MPa de resistencia a flexotracción, quedando como precedente para futuras investigaciones.

• Sobre el rol de las variables que intervienen en la fabricación de bloques de arcilla polimerizada

El análisis de la influencia de variables en función a la resistencia a compresión, ayudó a determinar el rol de los materiales precursores y de los procedimientos de fabricación y a la vez, sirvió para determinar los valores óptimos de cada variable para la correcta polimerización del tipo de arcilla seleccionada.

Arena:

La arena desempeñó un rol importante mejorando la trabajabilidad de la mezcla en proporciones que oscilaron entre 0,75 y 1,50 en relación al peso de la arcilla. Se concluyó que el tamaño de partícula de la arena influyó indirectamente en las características resistentes del material. A menor

tamaño de partícula se obtuvieron muestras con mayor resistencia a compresión simple.

Agua:

El agua funcionó como medio de reacción pero debió utilizarse en la menor proporción posible que permitiese mantener la plasticidad de la mezcla. El agua influyó negativamente a medida que aumentó en cantidad debido al incremento de la porosidad del material final. Los mejores resultados se obtuvieron con dosificaciones próximas al límite plástico de la arcilla utilizada.

Activador alcalino:

La influencia de la concentración molar del activador alcalino fue determinante para la disolución de los elementos de los materiales precursores que dieron lugar a la formación de nuevas redes poliméricas. Corroborando estudios previos recolectados del estado del arte, se determinó que en general, tomando en cuenta todos los ensayos realizados, NaOH promueve una mejor polimerización que KOH, pero en ejemplos puntuales, muestras fabricadas con KOH alcanzaron mayores resistencias a compresión debido a que es más básico que NaOH.

De todos modos, se observó una marcada tendencia de incremento a la resistencia a compresión con el incremento de la concentración molar (5M, 8M, 10M, 12M y 14M), evidenciando que, independientemente del tipo de activador, el factor determinante estuvo relacionado con su concentración molar. Además los resultados obtenidos con la arcilla seleccionada evidenciaron que, si bien es cierto que concentraciones mayores a 10M garantizan resistencias a compresión superiores a 20MPa, concentraciones de 5M a 8M ayudan a disminuir el impacto ambiental del material y pueden utilizarse para alcanzar resistencias de 10 a 15MPa respectivamente, las mismas que pueden ser competentes para varias

aplicaciones en la arquitectura.

Silicato de sodio:

Se determinó que el uso de silicato de sodio (Na_2SiO_3) es prescindible, ya que no contribuyó sustancialmente al incremento de resistencia a compresión de los geo-polímeros a base de la arcilla seleccionada, al contrario, incrementó el impacto ambiental del material final. Esta conclusión es importante para futuras aplicaciones e investigaciones que tengan el propósito de optimizar el impacto ambiental asociado a los activadores alcalinos.

Temperatura y tiempo de exposición:

La temperatura y el tiempo de exposición desempeñaron un papel determinante en el comportamiento mecánico de los geo-polímeros a base de la arcilla seleccionada. Esto corroboró investigaciones previas, ya que los mejores resultados fueron obtenidos con temperaturas que oscilaron entre 80 y 110°C con un tiempo de exposición entre 4 y 24 horas. Es importante señalar que estas temperaturas son bajas al compararlas con aquellas necesarias para la producción de materias primas de materiales de construcción con resistencias similares, por ejemplo, superiores a 500°C para fabricación de metacaolín y superiores a 1000°C para la producción de cemento o ladrillos cocidos. 80°C es una temperatura menor a la necesaria para hervir agua y podría ser alcanzada incluso mediante energía solar. Así, el uso de fuentes de energía alternativa para la fabricación de geo-polímeros a base de arcilla podría ser una línea de estudio que ayudaría a disminuir aún más el impacto ambiental.

Cal:

En las pruebas piloto, la adición de "cal viva" (CaO) no aportó al incremento de la resistencia a la compresión de probetas curadas a temperaturas entre 80 y 110°C, y por tanto, se concluyó que en estos casos, es recomendable prescindir de su uso puesto que incrementa el impacto ambiental del material. Sin embargo, la cal aportó a la resistencia

a compresión de probetas curadas a temperatura ambiente de laboratorio que alcanzaron los 10MPa. Las investigaciones futuras, que analicen si las adiciones de óxido de calcio, hidróxido de calcio, u otros aditivos pueden incrementar la resistencia de los geo-polímeros de arcilla a temperatura ambiente, podrían ayudar a reducir los niveles de impacto ambiental asociados al uso de temperatura.

Otros aditivos:

Las pruebas piloto realizadas con adición de fluidificantes de hormigón de uso comercial incrementaron la resistencia a compresión de las muestras. Esto se debió a que contribuyeron a la defloculación y mezcla de los materiales precursores y ayudaron a disminuir el contenido de agua. Las muestras piloto fabricadas con estos aditivos alcanzaron resistencias que oscilaron entre 30 y 35MPa. Estos datos pueden servir como precedentes para futuras investigaciones.

• Sobre la optimización de las características mecánicas de geo-polímeros de arcilla Tipo A

En relación a la arcilla seleccionada para los análisis, se consideraron que todas las formulaciones que superaron los 15MPa eran óptimas. Se concluyó que las muestras que en relación al peso de la arcilla contenían: 1,00 de arena; 0,30 de agua; 0,12 de hidróxido alcalino (NaOH o KOH con concentración molar de 10M), con temperaturas de 80 a 110°C durante 24 horas de exposición, mostraron los mejores resultados de resistencia a compresión y flexión. Los datos recolectados evidenciaron que se pueden utilizar diferentes formulaciones y estrategias de fabricación de bloques de arcilla polimerizada con excelentes resultados mecánicos y menor impacto ambiental que los ladrillos de arcilla cocida.

• Sobre el comportamiento de diferentes arcillas ante activación alcalina común

Mediante la aplicación de la formulación y procedimiento de fabricación optimizada para la arcilla Tipo A, se observó que la arcilla Tipo B y la arcilla Tipo C obtuvieron resistencias a compresión

próximas a 3 MPa, es decir, no alcanzaron niveles de polimerización significativos. La arcilla Tipo D obtuvo resistencias a compresión próximas a 10MPa y una mejor polimerización debido a su contenido de caolinita y a los rangos de óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de silicio (SiO_2) constituyentes.

La variación de la resistencia de los geo-polímeros a base de arcillas Tipo B, C, y D en relación a la resistencia de los geo-polímeros a base de arcilla Tipo A, se debió principalmente a su composición. Esto, en concordancia con estudios previos mostró que el rol de la caolinita es muy importante. Sin embargo, con la arcilla Tipo A se alcanzaron mayores resistencias que con la arcilla Tipo D, pese a que esta presentaba el mayor contenido de caolinita. Estos ensayos confirman que el resto de minerales de arcilla y componentes presentes en las partículas de tamaño arcilla son determinantes para la polimerización correcta del material, así como la formulación de un activador alcalino específico para cada caso. Se detectó que para una correcta polimerización es imprescindible considerar, a más del contenido de caolinita, el resto de componentes de la arcilla, el tipo de activador alcalino y el procedimiento de curado.

Mediante los análisis de caracterización realizados a cada tipo de arcilla: FRX, DRX, ATG, etc. y mediante datos recolectados del estado del arte se prevé que para la optimización de la arcilla Tipo B y C se debería adicionar arcilla caolinítica, o una fuente alterna de aluminosilicatos, ya sean puzolanas naturales, cenizas, metacaolín, o cualquier materia prima que ayude a incrementar el contenido de óxidos de aluminio (Al_2O_3) y reducir el ratio Si/Al. Además, debería usarse un activador alcalino con mayor molaridad para garantizar la disolución de especies que permitan la formación de nuevas redes poliméricas silato, una temperatura igual o superior a 100°C y un tiempo de exposición a temperatura entre 24 a 48 horas. Para la optimización de la arcilla Tipo D, se deberían adicionar pequeñas cantidades de silicato de sodio y usar una temperatura de 80°C con una exposición de 24 horas. La caracterización de las arcillas, queda como precedente para futuras investigaciones que incluyan estos materiales precursores.

Las investigaciones futuras que ayuden a determinar la sinergia entre: el contenido de aluminosilicatos con otros minerales de arcilla (como por ejemplo las illitas, esmectitas, cloritas, etc.) y otros elementos y partículas que sin ser minerales de arcilla están presentes en rangos inferiores a 2 μ m, permitirían ampliar el entendimiento del comportamiento microscópico. En un futuro no muy lejano, muy posiblemente los avances en la ciencia y tecnología, posibilitarán un mejor entendimiento del comportamiento de estructuras atómicas que servirá para el desarrollo de materiales óptimos a partir de cualquier tipo de silicato térreo.

• Sobre los análisis complementarios de geo-polímeros a base de arcilla Tipo A

Los análisis complementarios de geo-polímeros de arcilla Tipo A sirvieron para ampliar el conocimiento del material polimerizado. Mediante análisis por difracción de rayos X (DRX) se observó que los geo-polímeros de arcilla contenían altos porcentajes de cristales de cuarzo y que los minerales de arcilla, mediante activación alcalina, fueron policondensados en una sodalita hidratada o hidrosodalita con composiciones químicas similares a las de las zeolitas en fases semiamorfas, lo cual fue corroborado mediante análisis termogravimétrico (ATG) y análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Mediante análisis de porosimetría por inyección de mercurio, análisis de porosimetría y densidad por método tradicional, análisis de determinación de la absorción de agua por capilaridad y análisis de permeabilidad al vapor de agua se concluyó que los geo-polímeros de arcilla Tipo A son materiales que presentan una extensa red micro y macro porosa, además de una estructura mesoporosa a causa de los minerales de arcilla que la constituyen. La densidad y los fuertes enlaces a escala nanométrica dotan al material de características resistentes comparables a las del ladrillo cerámico, con excelentes prestaciones mecánicas, manteniendo la permeabilidad al agua y al vapor de agua.

Por medio del análisis del módulo de Young mediante la determinación del módulo de

elasticidad dinámico MOE, se concluyó que los materiales de arcilla polimerizada presentan características de rigidez similares a los ladrillos de arcilla cerámica, en gran parte gracias a su red porosa y a su densidad. Mediante procesos tecnificados que permitan la compactación del material durante el proceso inicial de polimerización, se podría aumentar la densidad del material, aumentar la resistencia, disminuir la porosidad y controlar rangos de rigidez para su uso en aplicaciones específicas. Esta podría ser una futura línea de investigación.

Los análisis de lixiviación evidenciaron que, a diferencia de geo-polímeros a base de aluminosilicatos altamente reactivos, los geo-polímeros de arcilla Tipo A presentaron una polimerización menor que repercutió en la lixiviación de una pequeña parte de elementos constitutivos, que no participaron en la formación de las nuevas redes poliméricas del material. Además este análisis permitió ratificar que existe una mejor polimerización con NaOH que con KOH. Investigaciones que permitan alcanzar niveles de polimerización más uniformes, ayudarían a reducir los niveles de lixiviación, lo cual podría ser útil para materiales que necesiten usarse en inmersión o en contacto directo con disolventes.

Mediante el análisis de comportamiento térmico se observó que los materiales de arcilla polimerizada Tipo A presentan una conductividad térmica similar a los ladrillos de arcilla cocida. Las investigaciones futuras que ayuden a determinar las propiedades térmicas de geo-polímeros fabricados a partir de arcillas con diferentes formulaciones, con diferente densidad y porosidad, podrían ser útiles para la aplicación de estos materiales como aislantes térmicos o como recubrimientos de protección contra el fuego, como ya ha pasado con geopolímeros fabricados a partir de metacaolín.

• Sobre el análisis de impacto ambiental

Mediante el análisis del impacto ambiental se determinó que los bloques experimentales de arcilla polimerizada presentan bajos niveles de energía incorporada en comparación con bloques de arcilla cocida.

El uso de materiales de arcilla geo-polimerizada se traduce en una reducción del 80% al 94% del impacto ambiental en comparación con los ladrillos de arcilla cocida.

El bloque de tierra comprimida (BTC) fue el material con menor impacto ambiental de la comparativa hecha con el ladrillo cocido, sin embargo, su resistencia es baja (3-4MPa).

También se observó que la mejora en el rendimiento mecánico de los bloques de arcilla polimerizada no está necesariamente vinculada a un aumento en su impacto ambiental, lo que demuestra la importancia de incluir el análisis de este parámetro en una etapa temprana en el diseño del material. Se podría obviar el uso de silicato de sodio o controlar la temperatura y el tiempo de exposición para reducir aún más el impacto ambiental.

Es importante señalar que, en comparación con los materiales de construcción fabricados a temperaturas superiores a 1000°C, los ladrillos experimentales de arcilla polimerizada requieren una temperatura diez veces menor (80°C - 100°C), alcanzable incluso con energía solar.

Mediante los resultados del análisis del impacto ambiental se confirma la hipótesis de esta investigación: los principios de geopolimerización pueden ser aplicados a la fabricación de materiales de arcilla natural, incrementando notablemente su desempeño mecánico (25-30MPa) con una gran reducción de los niveles de impacto ambiental en comparación a los ladrillos de arcilla cocida (80-94%).

4.2 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Los resultados y conclusiones obtenidas en la investigación demuestran el gran potencial de los materiales a base de arcilla polimerizada para su aplicación en la construcción y la arquitectura. Las características ambientales y mecánicas de los geo-polímeros de arcilla los convierte en una nueva generación de materiales y en una buena alternativa para reemplazar materiales de



Fig. 7.2 Fotografía de bloques y placas de arcilla polimerizada Tipo A fabricadas en la campaña experimental en el Laboratorio de materiales de la Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (EPSEB).

construcción que incorporan gran cantidad de energía.

Además, tomando en cuenta la gran disponibilidad de arcillas a nivel mundial, los geo-polímeros a base de arcilla pueden llegar a ser una opción para abastecer la demanda de materiales de construcción en países en vías de desarrollo que actualmente dependen de la importación de materiales procesados.

Este estudio se presenta como un punto de partida para futuras investigaciones que busquen el desarrollo y la aplicación de una nueva generación de materiales para la arquitectura.

A continuación se citan algunas líneas de investigación.

4.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los materiales de arcilla polimerizada han sido muy poco estudiados y por tanto existen múltiples aspectos que se desconocen. Las características propias de las arcillas, entendidas como nanomateriales naturales, y su capacidad

de transformación físico química, abren un gran abanico de posibilidades que requieren esfuerzos multidisciplinarios. A más de las futuras líneas de investigación referidas al material mencionadas anteriormente, a continuación se añaden líneas de investigación complementarias que podrían servir para el desarrollo de la tecnología y su aplicación:

El desarrollo de formulaciones químicas y/o procesos físicos que promuevan la defloculación de las arcillas que entran en contacto con los activadores químicos, ayudarían a reducir la cantidad de agua y mejorar la polimerización incluso a temperatura ambiente, lo cual disminuiría aun más la energía incorporada del material. Por ejemplo, existen investigaciones que han demostrado la mejora de la resistencia mecánica y estabilidad térmica de los geopolímeros a base de metacaolín mediante el uso de ultrasonidos que ayudan a la disolución acelerada de los materiales que son fuente de Al-Si.

Por otra parte, la implementación de software especializado para la formulación de geo-polímeros de materiales térreos que permita realizar cálculos multivariables complejos, procesando datos obtenidos de la caracterización de los materiales precursores: composición química; mineralogía;

tamaño de partícula; etc.; ayudaría a prever el comportamiento ante activación química y/o física mediante simulación. Esto facilitaría la formulación para cada tipo de arcilla e incrementaría su efectividad. Además, la implementación de una base de datos con valores del impacto ambiental de los materiales precursores y los procesos de fabricación garantizaría su optimización en la fase del diseño del material.

En lo referente a la construcción, será necesario la implementación de normativas enfocadas a la fabricación y uso de materiales de arcilla polimerizada.

Por otra parte, pese a que existen estudios que tratan procedimientos para el uso de arcillas en hormigones auto compactados, aún no se han logrado obtener resistencias mecánicas que compitan con el hormigón convencional. El estudio de formulaciones y procedimientos que ayuden a desarrollar hormigones de arcilla polimerizada podría constituir una importante línea de investigación. Además, los geo-polímeros a base de arcilla tienen un gran potencial para su aplicación en la impresión 3D, así como en otros campos de exploración tecnológica actual.

Considerando las características ambientales y mecánicas de los geo-polímeros de arcilla estudiados, la posibilidad de su aplicación en la arquitectura puede ser abordada desde múltiples perspectivas. El estudio de estrategias para la implementación de estos materiales; el diseño de elementos constructivos: mampuestos o elementos prefabricados de pequeño y gran formato; y el desarrollo de sistemas constructivos afines; constituyen líneas futuras de investigación.

Tabla de nomenclaturas y códigos de mezclas

Nomenclatura	Código	Nomenclatura	Código	Nomenclatura	Código
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT80-H2	GEO-A01	ATA-A1-RA0,38-KM10-RB0,12-CT80-H24	GEO-C403	ATA-A1-RA0,50-CT100-H24	P00X5-04
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT80-H2	GEO-A02	ATA-A1-RA0,42-KM10-RB0,13-CT80-H24	GEO-C404	ATA-A1-RA0,37-CT100-H24	P00X5-05
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT80-H2	GEO-A03	ATA-A1-RA0,3-KM8-CT80-H24	GEO-C501	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT80-H48	P00X6-01
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT80-H2	GEO-A04	ATA-A1-RA0,28-KM10-CT80-H24	GEO-C502	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC10,02-CT80-H48	P00X6-02
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT80-H2	GEO-A05	ATA-A1-RA0,26-KM12-CT80-H24	GEO-C503	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC20,02-CT80-H48	P00X6-03
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT80-H2	GEO-A06	ATA-A1-RA0,24-KM14-CT80-H24	GEO-C504	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC30,01-CT80-H48	P00X6-04
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT80-H2	GEO-A07	ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-C601	ATA-A10,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X7-01
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT80-H2	GEO-A08	ATA-A1-RA0,34-KM10-RB0,11-CT80-H24	GEO-C602	ATA-A11-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X7-02
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT120-H2	GEO-A09	ATA-A1-RA0,38-KM10-RB0,12-CT80-H24	GEO-C603	ATA-A11,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X7-03
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT120-H2	GEO-A10	ATA-A1-RA0,42-KM10-RB0,13-CT80-H24	GEO-C604	ATA-A11,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X7-04
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT120-H2	GEO-A11	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₀ ,06-CT80-H24	GEO-D101	ATA-A20,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X8-01
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT120-H2	GEO-A12	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₀ ,10-CT80-H24	GEO-D102	ATA-A21-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X8-02
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT120-H2	GEO-A13	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₀ ,14-CT80-H24	GEO-D103	ATA-A21,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X8-03
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT120-H2	GEO-A14	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₀ ,18-CT80-H24	GEO-D104	ATA-A21,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X8-04
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT120-H2	GEO-A15	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₀ ,06	GEO-D201	ATA-A30,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X9-01
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT120-H2	GEO-A16	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₀ ,10	GEO-D202	ATA-A31-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X9-02
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT80-H4	GEO-A17	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₀ ,14	GEO-D203	ATA-A31,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X9-03
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT80-H4	GEO-A18	ATA-A1-RA0,32-KM10-RC ₀ ,18	GEO-D204	ATA-A31,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P00X9-04
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT80-H4	GEO-A19	ATB-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24	GEO-E101	ATA-A1-RA0,17-NM10-RB0,05-RC00,24-CT110-H24	P00X10-01
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT80-H4	GEO-A20	ATB-A1-RA0,3-KM14-CT80-H24	GEO-E102	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-RC40,10	P00X10-02
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT80-H4	GEO-A21	ATB-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-E201	ATA-A1,2-RA0,33-NM10-RB0,09-RC50,01-CT110-H72	P00X10-03
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT80-H4	GEO-A22	ATB-A1-RA0,3-KM14-RB0,09-CT80-H24	GEO-E202	ATA-A1-RA0,29-NM10-RB0,08-RC50,01-CT110-H72	P00X10-04
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT80-H4	GEO-A23	ATC-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24	GEO-E301	ATA-A1-RA0,29-NM10-RB0,08-RC50,01-CT110-H72	P00X10-05
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT80-H4	GEO-A24	ATC-A1-RA0,3-KM14-CT80-H24	GEO-E302	ATA-A1-RA0,36-NM10-RB0,10-RC60,10	P00X10-06
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,04-CT120-H4	GEO-A25	ATC-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-E401	ATA-A1-RA0,36-NM10-RB0,10-RC40,10	P00X10-07
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,04-CT120-H4	GEO-A26	ATC-A1-RA0,3-KM14-RB0,09-CT80-H24	GEO-E402	ATA-A0,25-RA0,24-NM1-CT80-H24	P01-01
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,04-CT120-H4	GEO-A27	ATD-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24	GEO-E501	ATA-A0,5-RA0,24-NM1-CT80-H24	P01-02
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,04-CT120-H4	GEO-A28	ATD-A1-RA0,3-KM14-CT80-H24	GEO-E502	ATA-A1-RA0,24-NM1-CT80-H24	P01-03
ATA-A1-RA0,33-NM5-RB0,08-CT120-H4	GEO-A29	ATD-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-E601	ATA-A1,5-RA0,24-NM1-CT80-H24	P01-04
ATA-A1-RA0,37-NM5-RB0,09-CT120-H4	GEO-A30	ATD-A1-RA0,3-KM14-RB0,09-CT80-H24	GEO-E602	ATA-A0,25-RA0,3-NM1-CT80-H24	P02-01
ATA-A1-RA0,28-NM10-RB0,08-CT120-H4	GEO-A31	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP01	ATA-A0,5-RA0,36-NM1-CT80-H24	P02-02
ATA-A1-RA0,31-NM10-RB0,09-CT120-H4	GEO-A32	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP02	ATA-A1-RA0,52-NM1-CT80-H24	P02-03
ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-B01	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP03	ATA-A1,5-RA0,71-NM1-CT80-H24	P02-04
ATA-A1-RA0,3-NM5-CT80-H24	GEO-B02	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP04	ATA-A0,5-RA0,27-NM10-CT100-H24	P03-01
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24	GEO-B03	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP05	ATA-A1-RA0,36-NM10-CT100-H24	P03-02
ATA-A1-RA0,3-KM5-CT80-H24	GEO-B04	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP06	ATA-A1,5-RA0,45-NM10-CT100-H24	P03-03
ATA-A1-RA0,3-NM10-RB0,08-CT80-H24	GEO-B05	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP07	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H96	P04-01
ATA-A1-RA0,3-NM5-RB0,07-CT80-H24	GEO-B06	ATA-A1-RA0,3-NM10-CT80-H24	GEO-FP08	ATA-A1-RA0,41-NM10-RB0,11-CT100-H96	P04-02
ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-B07	ATA-A0,5-RA0,36	P00X1-01	ATA-A1-RA0,48-NM10-RB0,13-CT100-H96	P04-03
ATA-A1-RA0,3-KM5-RB0,08-CT80-H24	GEO-B08	ATA-A0,5-RA0,20-NT20-CT80-H6	P00X1-02	ATA-A1-RA0,36-NM10	P05-01
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H24	GEO-C101	ATA-A0,5-RA0,30-NT13-CT80-H6	P00X1-03	ATA-A1-RA0,36-NM10-CT110-H4	P05-02
ATA-A1-RA0,34-KM10-CT80-H24	GEO-C102	ATA-A0,5-RA0,36-NT36-CT80-H6	P00X1-04	ATA-A1-RA0,36-NM10-CT110-H7	P05-03
ATA-A1-RA0,38-KM10-CT80-H24	GEO-C103	ATA-A0,5-RA0,37-NM10-CT100-H24	P00X2-01	ATA-A1-RA0,36-NM10-CT110-H24	P05-04
ATA-A1-RA0,42-KM10-CT80-H24	GEO-C104	ATA-A1-RA0,49-NT10-CT100-H24	P00X2-02	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08	P06-01
ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-C201	ATA-A2-RA0,73-NT10-CT100-H24	P00X2-03	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H2	P06-02
ATA-A1-RA0,34-KM10-RB0,11-CT80-H24	GEO-C202	AC1-A1-RA0,41-NM10-RB0,11-CT100-H24	P00X3-01	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H7	P06-03
ATA-A1-RA0,38-KM10-RB0,12-CT80-H24	GEO-C203	ATA0,5-AC1-A1-RA0,27-NM10-RB0,11-CT100-H24	P00X3-02	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT110-H24	P06-04
ATA-A1-RA0,42-KM10-RB0,13-CT80-H24	GEO-C204	ATA0,67-AC1-A1-RA0,24-NM10-RB0,11-CT100-H24	P00X3-03	ATA-A0,75-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-01
ATA-A1-RA0,3-KM10	GEO-C301	AC1-A2-RA0,61-NM10-RB0,17-CT100-H4	P00X4-01	ATA-A1-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-02
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H7	GEO-C302	AC1-A3-RA0,81-NM10-RB0,23-CT100-H4	P00X4-02	ATA-A1,25-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-03
ATA-A1-RA0,3-KM10-CT80-H14	GEO-C303	AC1-A6,5-RA1,53-NM10-RB0,43-CT100-H4	P00X4-03	ATA-A1,5-RA0,30-NM10-RB0,08-CT100-H4	P07-04
ATA-A1-RA0,43-KM10-CT80-H24	GEO-C304	ATA-A1-RA0,50	P00X5-01		
ATA-A1-RA0,3-KM10-RB0,09-CT80-H24	GEO-C401	ATA-A1-RA0,50-CT100-H4	P00X5-02		
ATA-A1-RA0,34-KM10-RB0,11-CT80-H24	GEO-C402	ATA-A1-RA0,50-CT100-H24	P00X5-03		

Donde AT es el tipo de arcilla (A,B,C,D); A es la cantidad de arena (A, A₁, A₂ y A₃ con diámetro de partícula de 250µm, 1mm, 3mm y 3-6mm respectivamente) en relación a la arcilla en peso; RA es la cantidad de agua que interviene en la solución alcalina en relación a la arcilla en peso; NM es la concentración molar de la solución (NaOH); KM es la concentración molar de la solución (KOH); RB es la cantidad de Na₂OH₂ en relación a la arcilla en peso; RC es la cantidad (en relación a la arcilla en peso) y tipo de aditivo en donde RC₀ es agua marina, RC₁ es Sikament FF, RC₂ Sikament 165 ES FF, RC₃ es ViscoCrete 125 FF, RC₄ es Cal viva FF, RC₅ es Hexametáfosfato de sodio y RC₆ es Cal viva (F plus); CT es la temperatura a la que es expuesta la muestra; y H es el tiempo de exposición a temperatura.

Lista de figuras, imágenes y créditos

- Imagen de portada: Imagen diseñada a partir de la fotografía de la Fig. 7.2: Fotografía de bloques y placas de arcilla polimerizada Tipo A fabricadas en la campaña experimental. Autoría propia.

CRÉDITOS DE IMÁGENES CAPÍTULO 1

- Fig. 1.1. Los avances sobre el conocimiento físico de la composición de la materia podrán alterar la capacidad resistente de nuestros materiales y originar nuevas tipologías estructurales. Imágen modificada a partir de: <https://bit.ly/2Rq8N1G> (Isabella Breda) y <https://bit.ly/2QOolXP> (gravityim.com)
- Fig. 1.2. Línea del tiempo y consumo de energía de materiales de construcción. Autoría propia a partir de datos recopilados de: Venkatarama Reddy, B. V. (2009). Sustainable materials for low carbon buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 4(3), 175–181. <http://doi.org/10.1093/ijlct/ctp025> p. 176.

CRÉDITOS DE IMÁGENES CAPÍTULO 2

2.1 Las arcillas: nanomateriales naturales

- Fig. 2.0.1. La tierra es un material compuesto diferentes tipos de silicatos, entre ellos, los filosilicatos (arcillas) son el conglomerante principal. Fotografía: Isabella Breda, 2015, in occasione di PORTONI APERTI _ XVIII Festa della Ceramica – Nove (VI), Tessitura, Recuperado en Octubre 2018 de http://www.isabellabreda.it/il-mestiere-dellarte-_mulino-de-bortoli-_novevi/
- Fig. 3.0.1. Desde tiempos remotos la arcilla a formando parte de la vida del hombre: (arriba) “Los Guerreros de Terracota” o guerreros de Xian moldeados con arcilla hace más de 2200 años (China 210-209 a. C.); (abajo) Imagen (SEM) con una magnificación de 24000x de láminas de arcilla caolinítica tomada con un microscopio electrónico Thermo Fisher Scientific (2011). Recuperado en Octubre 2018 de: <https://bit.ly/2ltRqGr>; <https://bit.ly/2zQYPOH>
- Fig. 3.1.1 (Izquierda) Muro de tierra apisonada en la antigua ciudad de Chan Chan - Perú, construido aproximadamente hace 2600 años. Recuperado en Octubre 2018 de: <http://www.welcomeperutravel.com/espanol/fotos-peru/trujillo/muro-chan-chan.html>. (Derecha) Muro de tierra apisonada en la casa Lehmhaus Rauch, en el poblado de Schlins - Austria, construida por Martin Rauch en el año 2008. Recuperado en Octubre 2018 de: http://tectonicablog.com/wp-content/uploads/2009/11/MG_3539-455x303.jpg.
- Fig. 3.2.1. El tamaño de partícula es una característica determinante de las arcillas. En la imagen SEM de arcilla caolinita bien cristalizada de arenisca, es posible observar la morfología hexagonal, las superficies basales lisas y la abundancia de poros. Recuperado en Octubre 2018 de: <https://bit.ly/2znjdqy>
- Fig. 3.3.1. El tetraedro compuesto por un átomo de silicio y cuatro átomos de oxígeno es considerada la unidad fundamental de todos los silicatos, por ende, de las arcillas. Autoría propia.
- Fig. 3.3.2. Esquema del enlace covalente entre el átomo central de silicio y los cuatro átomos circundantes que forman el tetraedro (unidad básica de los silicatos). Autoría propia.
- Fig. 3.3.3. Diferentes tipos de representación gráfica del tetraedro. Autoría propia.
- Fig. 3.3.4. Esquemas de unión entre átomos y tetraedros. Autoría propia.
- Fig. 3.3.5. Ejemplos de minerales y esquemas de posibles uniones entre tetraedros en forma de redes simples y compuestas que dan origen a los diferentes tipos de silicatos. Autoría propia.
- Fig. 3.3.6. Ejemplos de enlaces covalentes que pueden darse entre diferentes elementos, gracias a las características eléctricas y a la capacidad de compartir electrones entre sí. Autoría propia.
- Fig. 3.4.1. Las arcillas pertenecen al grupo de los filosilicatos. Presentan una estructura laminar. Recuperado 11/2017 de: Urquiza, E. A. F., Luísa, M., & Rulduà, M. (2009). Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos, *XII(44)*, 35–41. p.37.
- Fig. 3.4.2. Composición de una lámina tipo T mediante la unión de tetraedros $(\text{SiO}_4)^4-$. Autoría propia.
- Fig. 3.4.3. Los filosilicatos se componen de varias láminas aplanadas apiladas y por tanto con una superficie específica muy elevada. Estos actúan como conglomerantes del resto de silicatos presentes en los suelos. Recuperado en Octubre de 2018: Fontaine, L., & Anger, R. (2009). *Bâtir en terre Du grain de sable à l'architecture*. Belin. p. 152.
- Fig. 3.4.4. Composición de una lámina tipo O mediante la unión de octaedros, y composiciones de láminas tipo T-O y T-O-T. Autoría propia. Fig. 3.4.5 Tanto tetraedros como octaedros y esquemas T, T-O y T-O-T son idealizados pero nos ayudan a visualizar y entender la estructura laminar de los minerales de arcilla. Recuperado en Octubre de 2018: Fontaine, L., & Anger, R. (2009). *Bâtir en terre Du grain de sable à l'architecture*. Belin. p. 156.
- Fig. 3.4.6. Disposición atómica. Recuperado 11/2017 de: Urquiza, E. A. F., Luísa, M., & Rulduà, M. (2009). Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos, *XII(44)*, 35–41. p.38.

- Fig. 3.4.7. Vista superior de los planos a) dioctaédrico y b) trioctaédrico. Recuperado 11/2017 de: Urquiza, E. A. F., Lluïsa, M., & Rulduà, M. (2009). Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos, XIII(44), 35–41. p.38.
- Fig. 3.4.8. Las arcillas son materiales porosos con espacios libres entre las capas, partículas y agregados que las conforman. Recuperado 11/2017 de: Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). Handbook of clay science. Elsevier. p.14.
- Fig. 3.4.9. Imágenes SEM (Scanning Electron Microscope) en donde se aprecian varias morfologías estructurales de varios tipos de arcilla. Recuperado 11/2017 de: Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). Handbook of clay science. p.15.
- Fig. 3.5.1. Clasificación de los minerales de arcilla. Auditoría propia a partir de: (Clay Mineralogy, Ralph E. Grim). Recuperado 11/2017 de: Grim, R. . (1968). Clay mineralogy. (2nd ed.). New York: McGraw-Hill. Retrieved from <https://bit.ly/2urQLOv>
- Fig. 3.5.2. Propuesta de clasificación de los filosilicatos, incluidos minerales de arcilla. (Auditoría propia a partir de Committee to the International Mineralogical Association -AIPEA). Recuperado 11/2017 de: Murray, H. H. (Haydn H. (1995). Applied clay mineralogy : occurrences, processing, and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays. Elsevier. Retrieved from <https://bit.ly/2uwvAsX>
- Fig. 3.5.3. Clasificación de los caolines - serpentinas. Recuperado 11/2017 de: Dominguez, J., & Schifter, I. (1995). Las arcillas: el barro noble. (Fondo de Cultura Económica; Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, Ed.)La ciencia para todos. Recuperado de: <https://bit.ly/2zL97zT>
- Fig. 3.5.4. Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de cristales de caolinita. Recuperado 11/2017 de: <https://bit.ly/2uDbOf>
- Fig. 3.5.5. Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de una Halloysita. Recuperado 11/2017 de: <https://bit.ly/2Ln1B2y>
- Fig. 3.5.6. Clasificación de las esmectitas. Recuperado 11/2017 de: Dominguez, J., & Schifter, I. (1995). Las arcillas: el barro noble. (Fondo de Cultura Económica; Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, Ed.)La ciencia para todos. Recuperado de: <https://bit.ly/2zL97zT>
- Fig. 3.5.7. Fórmulas químicas de algunas esmectitas. Recuperado 11/2017 de: Grimshaw, R. W., & Searle, A. B. (1971). The chemistry and physics of clays and allied ceramic materials (4th ed.). New York: Ernest Benn Limited. Retrieved from <https://bit.ly/2LgyPR9>
- Fig. 3.5.8. Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de una montmorillonita. Recuperado 11/2017 de: <https://bit.ly/2POXa09>
- Fig. 3.5.9. Clasificación de las micas. Recuperado 11/2017 de: Dominguez, J., & Schifter, I. (1995). Las arcillas: el barro noble. (Fondo de Cultura Económica; Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, Ed.)La ciencia para todos. Recuperado de: <https://bit.ly/2jwYGe>
- Fig. 3.5.10. Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de una illita. Recuperado 11/2017 de: <https://bit.ly/2L6gQ0l>
- Fig. 3.5.11. Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de una clorita. Recuperado 11/2017 de: <https://bit.ly/2L7BVrq>
- Fig. 3.5.12. Imagen SEM (Scanning Electron Microscope) de una vermiculita. Recuperado 11/2017 de: <https://bit.ly/2Nrfqi>
- Fig. 3.5.13. Imágenes SEM (Scanning Electron Microscope) de una palygorskita. Recuperado 11/2017 de: <https://bit.ly/2Lj6MAF>
- Fig. 3.6.1. Autoría propia.
- Fig. 3.6.2. La temperatura puede influir notablemente en el comportamiento de las arcillas. Recuperado 11/2017 de: Grim, R. . (1968). Clay mineralogy. (2nd ed.). New York: McGraw-Hill. Recuperado de: <https://bit.ly/2urQLOv>

2.2 Geopolimerización

- Fig. 4.0.1. "Los geopolímeros, son materiales compuestos por cadenas o redes de moléculas minerales vinculadas con enlaces covalentes". (Geopolymer Institute). Foto montaje a partir de imagen recuperada en Octubre 2017 de: <https://bit.ly/2Dc7zPm>
- Fig. 4.1.1. Pieza estructural prefabricada de geopolímero a base de ceniza volante. Queensland's Global Change Institute (GCI) University - Australia (2013). Recuperado el 18-12-2016 de: http://blightanner.com.au/wp-content/uploads/2014/10/JBZ_7225-1400x933.jpg
- Fig. 4.1.2. Paneles resistentes al fuego a base de geopolímeros (Nu-core® A2FR). Recuperado el 18-12-2016 de: <http://nucore.hostingbyplatform.com/?p=32>
- Fig. 4.1.3. Diferentes geopolímeros sintetizados a partir de diferentes precursores de aluminosilicatos. Recuperado el 18-12-2016 de: <https://bit.ly/2Fha2ux>
- Fig. 4.2.1. Pieza estructural prefabricada de geopolímero a base de ceniza volante - Queensland's Global Change Institute (GCI) University - Australia (2013). Recuperado el 18-12-2016 de: <https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/>
- Fig. 4.2.2. Morteros alcalinamente activados, comparados con cemento Portland (OPC) y ligante de sulfoaluminatos de calcio. El sombreado indica contenido alcalino aproximado; el sombreado más oscuro corresponde a concentraciones más altas de Na y/o K. Recuperado de: Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). Alkali Activated Materials (Vol. 13). http://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2_p_08. (Diagrama cortesía de I. Beleña)
- Fig. 4.3.1. Eventos destacados en la historia de materiales alcalinamente activados hasta 2015. Tabla elaborada a partir de información recuperada el 18-12-2016 de: Pacheco-Torgal, F. (2015). Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. United Kingdom: Woodhead Pub. pp 01-16.
- Fig. 4.4.1. Diferentes sistemas de geopolímeros basados en el número de unidades siloxo Si-O (según Davidovits). Recuperado el 18-12-2016 de: Davidovits, J. (2015). Geopolymer, Chemistry and Applications. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- Fig. 4.4.2. Diferentes sistemas de geopolímeros basados en el número de unidades siloxo Si-O (según Davidovits). Recuperado el 18-12-2016 de: Davidovits, J. (2015). Geopolymer, Chemistry and Applications. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- Fig. 4.5.1. Imagen de cenizas volantes subproductos de la quema de carbón (a). Imágenes SEM que permiten observar la forma esférica de las partículas que componen la ceniza volante (b) y (c). Recuperado el 18-12-2016 de: (a) <https://www.masterbuilder.co.in/wp-content/uploads/2017/08/Coal-Fly-Ash-Class-F.jpg>; (b) https://www.researchgate.net/profile/Jan_Elsen2/publication/259357577/figure/fig12/AS:297018267324427@1447826081480/Figure-18-SEM-picture-of-a-typical-fly-ash-with-its-mostly-spherical-and-some-angular.png (c) <http://images.monolithic.org/img/2011/08/31/4e5e5740c29e061965000001/medium/flyash15.jpg>
- Fig. 4.5.2. Imagen de metacaolín (a) Imágenes SEM que permiten observar la forma semi amorfa de las partículas que componen el metacaolín (b) y (c). Recuperado el 18-12-2016 de: (a) <https://www.universalimpex.asia/assets/images/demo/metakaolin-3.jpg>; (b)

- https://www.researchgate.net/profile/lbrahim_Messaoudene2/publication/279937953/figure/fig2/AS:366283196518402@1464340127168/Figure-2-Morphology-of-metakaolin-SEM-GSE-mode.ppm; (c) <https://www.sciencedirect.com.recursos.biblioteca.upc.edu/cache/MiamImageURL/1-s2.0-S0169131717303101-gr1.jpg?wchp=dGlBvBAzSkVz&pii=S0169131717303101>.
- Fig. 4.5.3. Lista de algunos minerales aptos para la geopolimerización, con su respectivo contenido de SiO₂ Recuperado el 12/2016 de: Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
 - Fig. 4.6.1. Efecto del Hidróxido de Sodio (NaOH) sobre la ceniza de cáscara de arroz según la concentración. Recuperado el 12/2016 de: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0950061815304530-gr7.jpg>
 - Fig. 4.6.2. Imágenes SEM de pastas de ceniza volante activadas usando: (a y b) 8M NaOH; (c y d) 8M KOH; (e) silicato de sodio (Ms=2.0) y (f) silicato de potasio (Ms=2.0). Recuperado el 12/2016 de: <http://www.sciencedirect.com.recursos.biblioteca.upc.edu/cache/MiamImageURL/1-s2.0-S0958946514002285-gr2.jpg?wchp=dGlzVlS-zSkzS&pii=S0958946514002285>
 - Fig. 4.7.1. Diagrama básico de la formación de geopolímeros. Recuperado el 12/2016 de: Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials* (Vol. 13). <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2> p. 08
 - Fig. 4.7.2. Esquema del proceso de síntesis de geopolímeros (5 etapas). Recuperado el 12/2016 de: Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z> p. 2919
 - Fig. 4.7.3. Esquema del proceso de disolución. La reacción comienza cuando los iones OH⁻ en la solución alcalina separan los enlaces Si-O-Si Recuperado el 12/2016 de: <http://elbibliote.com/recursos/Temas/html/1352.php>
 - Fig. 4.7.4. Esquema del proceso de síntesis de geopolímeros (3 etapas). Imágenes recuperadas en octubre de 2017 a partir de: https://youtu.be/_BX8EOIEkVI
 - Fig. 4.8.1. Existen diferentes tipos de geopolímeros. El geopolímero final dependerá de los componentes utilizados, y de las características de preparación un curado. Imagen de autor.
 - Fig. 4.9.1. En la actualidad las prácticas y materiales empleados en la construcción conllevan un alto impacto ambiental. La producción de una tonelada de cemento Portland genera una tonelada de CO₂ que es liberada en la atmósfera. Recuperado el 12/2016 de: http://cms.ipressroom.com.s3.amazonaws.com/173/files/20158/560577b1299b5031a7000771_Cement+plant/Cement+plant_mid.jpg
 - Fig. 4.10.1. Dedicación a la investigación de Geopolímeros. Análisis comparativo según datos de Science Direct. Autoría propia.
 - Fig. 4.10.2. Dedicación a la investigación de Geopolímeros. Análisis comparativo según datos de Web of Science. Autoría propia.
 - Fig. 4.11.1. Edificio residencial en Mariupol, Ucrania, construido a partir de bloques prefabricados de escoria activadas con hidróxido alcalino (exterior revestido de yeso). Recuperado el 12/2016 de: Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials* (Vol. 13). <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2> p.312
 - Fig. 4.11.2. Edificio de 24 pisos construido con hormigón de cemento de escoria activado por álcali, Lipetsk, Rusia, 1994. Recuperado el 12/2016 de: Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials* (Vol. 13). <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2> p. 311
 - Fig. 4.11.3. Comparación de hormigón vertido in situ, de cemento de escoria activada por álcali (lado izquierdo) y cemento Portland (lado derecho). Ternopol, Ucrania. Recuperado el 12/2016 de: Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials* (Vol. 13). <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2> p. 316
 - Fig. 4.11.4. The University of Queensland Global Change Institute. HASSELL en colaboración con Bligh Tanner, Arup y Medland Metropolis, 2013. Utilización de piezas estructurales y de acabado de geopolímeros prefabricados. Recuperado en Octubre de 2017 de: <https://www.hassellstudio.com/en/cms-projects/detail/the-university-of-queensland-global-change-institute>

2.3 Geopolímeros a base de arcillas

- Fig. 5.0.1. Imagen SEM de una vermiculita expandida - Francisco Rangel, National Institute of Technology- INT / MCTI, Brazil. Recuperado en octubre 2017 de: <https://www.fei.com/image-contest/grand-prize-winners/>
- Fig. 5.1.1. Composición y características de los principales minerales de arcilla. Recuperado en octubre 2017 de: Deer, R. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1997). *Rock-forming minerals*. Vol. 5B, Non-silicates. Geological Society. pp.225-226. https://books.google.es/books/about/Rock_forming_Minerals.html?id=bAkeAQAAMAAJ&redir_esc=y.
- Fig. 5.2.1. Esquema que muestra la presencia de silicio en la estructura del polisilano del mismo modo que el carbono en el polietileno. Recuperado en octubre 2017 de: Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- Fig. 5.2.2. Esquema que muestra los tres tipos de siliconas y la estructura química del cuarzo. Recuperado en octubre 2017 de: Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- Fig. 5.2.3. Atomo de aluminio trivalente y tetravalente. Recuperado el 15-10-2017 de: Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- Fig. 5.3.1. Esquema estructural de algunos minerales de arcilla (Estructuras laminares). Recuperado en octubre 2017 de: Grimshaw, R. W., & Searle, A. B. (1971). *The chemistry and physics of clays and allied ceramic materials* (4th ed.). New York: Ernest Benn limited. p.139. https://books.google.es/books/about/The_chemistry_and_physics_of_clays_and_a.html?id=22gZAQAIAAJ&redir_esc=y
- Fig. 5.3.2. Esquema estructural la caolinita. Recuperado en octubre 2017 de: Grimshaw, R. W., & Searle, A. B. (1971). *The chemistry and physics of clays and allied ceramic materials* (4th ed.). New York: Ernest Benn limited. https://books.google.es/books/about/The_chemistry_and_physics_of_clays_and_a.html?id=22gZAQAIAAJ&redir_esc=y
- Fig. 5.3.3. Ataque químico de capas de caolinita. Recuperado en octubre 2017 de: Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629. <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>
- Fig. 5.5.1. Esquema elemental de la acción de ácidos (izquierda) y alcalinos (derecha) en el comportamiento de las arcillas. Recuperado en octubre 2017 de: Fontaine, L., & Anger, R. (2009). *Bâtir en terre Du grain de sable à l'architecture*. Belin. p. 175.
- Fig. 5.6.1. Gráficos de resistencia a compresión de geopolímeros.(A). Recuperado en octubre 2017 de: Esaifan, M., Rahier, H., Barhoum, A., Khoury, H., Hourani, M., & Wastiels, J. (2015). Development of inorganic polymer by alkali-activation of untreated kaolinitic clay: Reaction stoichiometry, strength and dimensional stability. *Construction and Building Materials*, 91, 251–259. <http://doi.org/10.1016/j>

- conbuildmat.2015.04.034
- Fig. 5.6.2. Gráficos de resistencia a compresión de geopolímeros (B). Recuperado en octubre 2017 de: Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G., Djétéli, G., Blanchart, P., Alowanou, D., Kpelou, P., ... Praisler, M. (2014). How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural characteristic of kaolin-based geopolymers. *Ceramics International*, 40(7 PART A), 8953–8962. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.02.052>
- Fig. 5.6.3. Gráficos de resistencia a compresión de geopolímeros (C). Recuperado en octubre 2017 de: Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G. L., Djétéli, G., & Blanchart, P. (2013). Kaolin-based geopolymers: Effect of mechanical activation and curing process. *Construction and Building Materials*, 42, 105–113. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.069>
- Fig. 5.6.4. Gráficos de resistencia a compresión de geopolímeros (D). Recuperado en octubre 2017 de: Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2013). Characterization of alkali activated kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 75–76, 120–125. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.005>
- Fig. 5.6.5. Gráficos de resistencia a compresión de geopolímeros (D). Recuperado en octubre 2017 de: Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2013). Characterization of alkali activated kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 75–76, 120–125. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.005>

CRÉDITOS DE IMÁGENES CAPÍTULO 3

Estudio experimental de geopolímeros de arcillas en función de la resistencia mecánica

- Fig. 6.0.1. Microscopías de arcillas. Autoría propia
- Fig. 6.3.2. Análisis y normas de referencia para la caracterización del “geo-polímero”. Autoría propia
- Fig. 6.3.3. Análisis de referencia según la norma UNE 41410:2008 (Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques). Autoría propia
- Fig. 6.5.1. Características de la arena. Información suministrada por el distribuidor: Àrids per a la Indústria i la Depuració, S.L.
- Fig. 6.5.3. Especificaciones Técnicas. Autoría propia a partir de información suministrada por el distribuidor.
- Fig. 6.5.5. Arcillas utilizadas en la campaña experimental. A) Arcilla LILA, B) Arcilla BEIG PEN/F, C) Arcilla ROJA, D) Caolín MD-25. Autoría propia.
- Fig. 6.6.1 las arcillas pueden ser fuente de aluminosilicatos en procesos de polimerización por activación alcalina. Bloque de arcilla polimerizada fabricado a partir de arcilla Tipo A. Autoría propia.
- Fig. 6.6.1.1.1. Límite líquido y límite plástico. Autoría propia.
- Fig. 6.6.1.1.2. Arcilla Tipo A. Autoría propia.
- Fig. 6.6.1.2.1. Granulometría suministrada por el distribuidor. Autoría propia.
- Fig. 6.6.1.2.2. Composición suministrada por el distribuidor. Autoría propia.
- Fig. 6.6.1.3.1. Interpretación DRX e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación catalogando los minerales (arcillas). Dr. Juan Diego Martín Martín del Dpt. Mineralogía, Petrología i Geologia Aplicada de la Universitat de Barcelona
- Fig. 6.6.1.3.2. Cuadro resumen de interpretación DRX. Autoría propia.
- Fig. 6.6.1.4.1. Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo A. Autoría propia.
- Fig. 6.6.1.5.1. Análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) y la cuantificación de los compuestos químicos. Autoría propia.
- Fig. 6.6.1.6.1. Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo A. Autoría propia.
- Fig. 6.6.1.7.1. Microscopía (SEM). Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.1.7.2. Microscopía (SEM). Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.1.7.3. Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.1.7.4. Espectro 8 - Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.1.7.5. Espectro 9 - Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.1.7.6. Microscopías (SEM) Arcilla Tipo A. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.2.1.1. Límite líquido y límite plástico. Autoría propia.
- Fig. 6.6.2.1.2. Arcilla Tipo B. Autoría propia.
- Fig. 6.6.2.2.1. Granulometría suministrada por el distribuidor. Autoría propia.
- Fig. 6.6.2.2.2. Composición suministrada por el distribuidor. Autoría propia.
- Fig. 6.6.2.3.1. Interpretación DRX e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación catalogando los minerales (arcillas). Dr. Juan Diego Martín Martín del Dpt. Mineralogía, Petrología i Geologia Aplicada de la Universitat de Barcelona.
- Fig. 6.6.2.3.2. Cuadro resumen de interpretación DRX. Autoría propia.
- Fig. 6.6.2.4.1. Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo B. Autoría propia.
- Fig. 6.6.2.5.1. Análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) y la cuantificación de los compuestos químicos. Autoría propia.
- Fig. 6.6.2.6.1. Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo B. Autoría propia.
- Fig. 6.6.2.7.1. Microscopía (SEM). Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.2.7.2. Microscopía (SEM). Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.2.7.3. Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.2.7.4. Espectro 12 - Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.2.7.5. Espectro 13 - Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.2.7.6. Microscopías (SEM) Arcilla Tipo B. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.3.1.1. Límite líquido y límite plástico. Autoría propia.
- Fig. 6.6.3.1.2. Arcilla Tipo C. Autoría propia.
- Fig. 6.6.3.2.1. Granulometría suministrada por el distribuidor. Autoría propia.
- Fig. 6.6.3.2.2. Composición suministrada por el distribuidor. Autoría propia.

- Fig. 6.6.3.3.1. Interpretación DRX e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación catalogando los minerales (arcillas). Dr. Juan Diego Martín Martín del Dpt. Mineralogía, Petrología i Geología Aplicada de la Universitat de Barcelona.
- Fig. 6.6.3.3.2. Cuadro resumen de interpretación DRX. Autoría propia.
- Fig. 6.6.3.4.1. Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo C. Autoría propia.
- Fig. 6.6.3.5.1. Análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) y la cuantificación de los compuestos químicos. Autoría propia.
- Fig. 6.6.3.6.1. Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo C. Autoría propia.
- Fig. 6.6.3.7.1. Microscopía (SEM). Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.3.7.2. Microscopía (SEM). Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.3.7.3. Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.3.7.4. Espectro 14 - Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.3.7.5. Espectro 15 - Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.3.7.6. Microscopías (SEM) Arcilla Tipo C. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.4.1.1. Límite líquido y límite plástico. Autoría propia.
- Fig. 6.6.4.1.2. Arcilla Tipo D. Autoría propia.
- Fig. 6.6.4.2.1. Granulometría suministrada por el distribuidor. Autoría propia.
- Fig. 6.6.4.2.2. Composición suministrada por el distribuidor. Autoría propia.
- Fig. 6.6.4.3.1. Interpretación DRX e identificación de los picos de las muestras y la semicuantificación catalogando los minerales (arcillas). Dr. Juan Diego Martín Martín del Dpt. Mineralogía, Petrología i Geología Aplicada de la Universitat de Barcelona.
- Fig. 6.6.4.3.2. Cuadro resumen de interpretación DRX. Autoría propia.
- Fig. 6.6.4.4.1. Análisis termogravimétrico (ATG) de arcilla Tipo D. Autoría propia.
- Fig. 6.6.4.5.1. Análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) y la cuantificación de los compuestos químicos. Autoría propia.
- Fig. 6.6.4.6.1. Análisis granulométrico mediante difracción láser (ADL) de arcilla Tipo D. Autoría propia.
- Fig. 6.6.4.7.1. Microscopía (SEM). Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.4.7.2. Microscopía (SEM). Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.4.7.3. Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.4.7.4. Espectro 17 - Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.4.7.5. Espectro 18 - Análisis SEM - Cuantitativo. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.4.7.6. Microscopías (SEM) Arcilla Tipo D. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.6.5.1 Comparación de las gráficas DRX de las diferentes arcillas utilizadas en la campaña experimental.
- Fig. 6.6.5.2 Comparación de las gráficas TGA hasta los 200°C de las diferentes arcillas utilizadas en la campaña experimental.
- Fig. 6.6.5.3 Comparación de las gráficas ADL de las diferentes arcillas utilizadas en la campaña experimental
- Fig. 6.7.1.1. Probetas de ensayo Geo A. Autoría propia.
- Fig. 6.7.1.2. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo A. Autoría propia.
- Fig. 6.7.2.1. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo B. Autoría propia.
- Fig. 6.7.2.2. Probetas de ensayo Geo B. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.1. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo C1. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.1a. Probetas de ensayo Geo C1. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.2. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo C2. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.2a. Probetas de ensayo Geo C2. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.3. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo C3. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.3a. Probetas de ensayo Geo C3. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.4. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo C4. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.4a. Probetas de ensayo Geo C4. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.5. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo C5. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.5a. Probetas de ensayo Geo C5. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.6. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo C6. Autoría propia.
- Fig. 6.7.3.6a. Probetas de ensayo Geo C6. Autoría propia.
- Fig. 6.7.4.1. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo D1. Autoría propia.
- Fig. 6.7.4.1a. Probetas de ensayo D1. Autoría propia.
- Fig. 6.7.4.2. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo D2. Autoría propia.
- Fig. 6.7.4.2a. Probetas de ensayo D2. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.1. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo E1. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.1a. Probetas de ensayo E1. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.2. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo E2. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.2a. Probetas de ensayo E2. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.3. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo E3. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.3a. Probetas de ensayo E3. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.4. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo E4. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.4a. Probetas de ensayo E4. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.5. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo E5. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.5a. Probetas de ensayo E5. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.6. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo E6. Autoría propia.
- Fig. 6.7.5.6a. Probetas de ensayo E6. Autoría propia.
- Fig. 6.7.6.1. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo FP-A. Autoría propia.
- Fig. 6.7.6.1a. Probetas de ensayo FP-A. Autoría propia.
- Fig. 6.7.6.2. Diseño de experimentos (DOE) y cuadro de materiales utilizados en la campaña Geo FP-B. Autoría propia.
- Fig. 6.7.6.2a. Probetas de ensayo FP-B. Autoría propia.

- Fig. 6.9.1.1 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-A. Autoría propia.
- Fig. 6.9.1.2. Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-A. Autoría propia.
- Fig. 6.9.2.1 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-B. Autoría propia.
- Fig. 6.9.2.2. Resistencia a compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-B. Autoría propia.
- Fig. 6.9.3.1. Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-C. Autoría propia.
- Fig. 6.9.3.2. Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-C. Autoría propia.
- Fig. 6.9.4.1. Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-D. Autoría propia.
- Fig. 6.9.4.2. Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-D. Autoría propia.
- Fig. 6.9.5.1. Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-E. Autoría propia.
- Fig. 6.9.5.2. Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-E. Autoría propia.
- Fig. 6.9.6.1. Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental GEO-FP. Autoría propia.
- Fig. 6.9.6.2 Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental GEO-FP. Autoría propia.
- Fig. 6.9.6.3 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental P. Autoría propia.
- Fig. 6.9.6.4 Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental P. Autoría propia.
- Fig. 6.9.6.5 Tabla de códigos y nomenclaturas de mezclas - campaña experimental POOX. Autoría propia.
- Fig. 6.9.6.6 Resistencia a flexión y compresión de las probetas de la campaña experimental POOX. Autoría propia.
- Fig. 6.10.1.1. Pareto de los efectos de las variables en la resistencia a compresión (MPa) - Campaña GEO-A. Autoría propia.
- Fig. 6.10.1.2. Gráfica de los efectos de las variables en la resistencia a compresión (MPa) - Campaña GEO-A. Autoría propia.
- Fig. 6.10.1.3. Gráfica de efectos principales que afectan la resistencia a compresión (MPa). Autoría propia.
- Fig. 6.10.1.4. Gráfica de interacción de variables y sus efectos en la resistencia a compresión (MPa). Autoría propia.
- Fig. 6.10.1.5. Gráfica de superficie de respuestas de variables por par y sus efectos en la resistencia a compresión (MPa). Autoría propia.
- Fig. 6.10.2.1. Pareto de los efectos de las variables en la resistencia a compresión (MPa) - Campaña GEO-B. Autoría propia.
- Fig. 6.10.2.2. Gráfica de los efectos de las variables en la resistencia a compresión (MPa) - Campaña GEO-B. Autoría propia.
- Fig. 6.10.2.3. Gráfica de efectos principales que afectan la resistencia a compresión (MPa). Autoría propia.
- Fig. 6.10.2.4. Gráfica de interacción de variables y sus efectos en la resistencia a compresión (MPa). Autoría propia.
- Fig. 6.10.2.5. Gráfica de superficie de respuestas de variables por par y sus efectos en la resistencia a compresión (MPa). Autoría propia.
- Fig. 6.10.3.1. Probetas de ensayo P01. Autoría propia.
- Fig. 6.10.3.2. Probetas de ensayo P02. Autoría propia.
- Fig. 6.10.3.3. Probetas de ensayo P03. Autoría propia.
- Fig. 6.10.3.4. Probetas de ensayo P07. Autoría propia.
- Fig. 6.10.3.5. Probetas de ensayo POOX7. Autoría propia.
- Fig. 6.10.4.1. Probetas de ensayo GEO-C1. Autoría propia.
- Fig. 6.10.4.2. Probetas de ensayo GEO-C2. Autoría propia.
- Fig. 6.10.4.3. Probetas de ensayo GEO-C5. Autoría propia.
- Fig. 6.10.4.4. Probetas de ensayo GEO-Có. Autoría propia.
- Fig. 6.10.4.5. Probetas de ensayo P04. Autoría propia.
- Fig. 6.10.5.1. Probetas de ensayo P02. Autoría propia.
- Fig. 6.10.5.3. Probetas de ensayo GEO-C6. Autoría propia.
- Fig. 6.10.5.4. Probetas de ensayo GEO-B (parte 1). Autoría propia.
- Fig. 6.10.5.5. Probetas de ensayo GEO-B (parte 2). Autoría propia.
- Fig. 6.10.6.1. Probetas de ensayo GEO-B02 - B06. Autoría propia.
- Fig. 6.10.6.2. Probetas de ensayo GEO-B01 - B05. Autoría propia.
- Fig. 6.10.6.3. Probetas de ensayo GEO-B04 - B08. Autoría propia.
- Fig. 6.10.6.4. Probetas de ensayo GEO-B 03 - B07. Autoría propia.
- Fig. 6.10.6.5. Probetas de ensayo GEO-C1 y GEO-C2. Autoría propia.
- Fig. 6.10.7.1. Probetas de ensayo GEO-A (03,19,11,27). Autoría propia.
- Fig. 6.10.7.2. Probetas de ensayo GEO-A (07,23,14,31). Autoría propia.
- Fig. 6.10.7.3. Probetas de ensayo P05. Autoría propia.
- Fig. 6.10.7.4. Probetas de ensayo P06. Autoría propia.
- Fig. 6.10.7.5. Probetas de ensayo GEO-C. Autoría propia.
- Fig. 6.10.8.1. Probetas de ensayo GEO-D1. Autoría propia.
- Fig. 6.10.8.2. Probetas de ensayo GEO-D2. Autoría propia.
- Fig. 6.10.8.3. Probetas de ensayo GEO-C3 04 y Geo D1 04. Autoría propia.
- Fig. 6.10.8.4. Probetas de ensayo GEO-C3 01 - GEO-D2 01. Autoría propia.
- Fig. 6.10.8.5. Probetas de ensayo POOX10 (02,06,07). Autoría propia.
- Fig. 6.10.9.1. Probetas de ensayo POOX6 (03, 02, 01). Autoría propia.
- Fig. 6.10.9.2. Probetas de ensayo P06-04 y POOX6-01. Autoría propia.
- Fig. 6.10.10.1. Formulaciones de las probetas que mostraron mejor comportamiento mecánico (mayor a 20 MPa). Autoría propia.
- Fig. 6.10.10.2. Muestras con mayor comportamiento mecánico (mayor a 20 MPa). Autoría propia.
- Fig. 6.11.1. Comparación del comportamiento mecánico de resistencia a compresión simple de diferentes tipos de arcilla ante acción de KOH - 10M con y sin adición de Na₂SiO₃. Autoría propia.
- Fig. 6.11.2. Comparación del comportamiento mecánico de resistencia a compresión simple de diferentes tipos de arcilla ante acción de KOH - 14M con y sin adición de Na₂SiO₃. Autoría propia.
- Fig. 6.11.3. Análisis SEM de muestra GEO-B03 fabricada a partir de la arcilla Tipo A (izquierda - interpretación de análisis FRX). Autoría propia.
- Fig. 6.11.4. Análisis SEM de muestra GEO-E1-01 fabricada a partir de la arcilla Tipo B (izquierda - interpretación de análisis FRX). Autoría propia.

- Fig. 6.11.5. Análisis SEM de muestra GEO-E3-01 fabricada a partir de la arcilla Tipo C (izquierda - interpretación de análisis FRX). Autoría propia.
- Fig. 6.11.6. Análisis SEM de muestra GEO-E5-01 fabricada a partir de la arcilla Tipo D (izquierda - interpretación de análisis FRX). Autoría propia.
- Fig. 6.11.7 Piezas de geopolímeros fabricados con arcilla Tipo A (Muestra GEO-B03) con una resistencia a la compresión de 29,3MPa.
- Fig. 6.12. Análisis SEM de polímeros de arcilla P00x10-07 con microestructura semi amorfa. Autoría propia.
- Fig. 6.12.1 Análisis DRX de geo-polímeros de arcilla GEO-B03, GEO-B05 y GEO-B07. Autoría propia.
- Fig. 6.12.2.1. Análisis ATG de muestra GEO-B03. Autoría propia.
- Fig. 6.12.2.2. Análisis ATG de muestra GEO-B07. Autoría propia.
- Fig. 6.12.2.3. Análisis ATG de muestra GEO-D0102. Autoría propia.
- Fig. 6.12.3. Imágenes SEM de polímeros a base de arcilla Tipo A. Autoría propia bajo dirección de la Dra. Antonia Navarro.
- Fig. 6.12.4.1. Resultados de porosimetría de mercurio. Autoría propia.
- Fig. 6.12.4.2. Fotografía de la muestra GEO-D103 en donde se observan los macro poros del polímero a base de arcilla Tipo A. Autoría propia.
- Fig. 6.12.5. Resultados del ensayo para cálculo de porosidad. Autoría propia.
- Fig. 6.12.6. Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad. Autoría propia.
- Fig. 6.12.7. Resultados del análisis de permeabilidad al vapor de agua. Autoría propia.
- Fig. 6.12.8. Esquema que indica la cara de impacto correspondiente al valor MOEflex y MOELong. Información recuperada de Rosell, J. R., & Cantalapiedra, I. R. (2011). Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento. *Materiales de Construcción*, 30(1), 39–48. <http://doi.org/10.3989/mc.2010.53509>.
- Fig. 6.12.8a. Resultados del análisis para determinación del módulo de elasticidad dinámico (MOE). Autoría propia.
- Fig. 6.12.10. Resultados del análisis de comportamiento durante la lixiviación para la caracterización básica. Autoría propia.
- Fig. 6.12.11. Resultados del análisis de comportamiento térmico. Autoría propia.
- Fig. 6.13.1 Comparación del impacto ambiental en relación a la resistencia a compresión de las diferentes muestras analizadas. Autoría propia a partir de: J.C Calderón; A. Torres-Rivas; M. Palumbo; D. Boer; J.R. Rosell d. (2018). "Compressive strength and embodied environmental impact of experimental polymerized-clay brick". Barcelona.
- Fig. 6.13.2 Efecto de la dosificación de aditivos sobre el impacto ambiental. Autoría propia a partir de: J.C Calderón; A. Torres-Rivas; M. Palumbo; D. Boer; J.R. Rosell d. (2018). "Compressive strength and embodied environmental impact of experimental polymerized-clay brick". Barcelona.
- Fig. 6.13.3 Efecto de la dosificación de aditivos sobre la resistencia a la compresión. Autoría propia a partir de: J.C Calderón; A. Torres-Rivas; M. Palumbo; D. Boer; J.R. Rosell d. (2018). "Compressive strength and embodied environmental impact of experimental polymerized-clay brick". Barcelona.
- Fig. 6.13.4 Impacto ambiental de un muro macizo que soporta 200 kg/mL. Autoría propia a partir de: J.C Calderón; A. Torres-Rivas; M. Palumbo; D. Boer; J.R. Rosell d. (2018). "Compressive strength and embodied environmental impact of experimental polymerized-clay brick". Barcelona.

CRÉDITOS DE IMÁGENES CAPÍTULO 4

Conclusiones

- Fig. 7.1. Los polímeros de arcilla podrían constituir una alternativa a materiales de construcción con gran cantidad de energía en la arquitectura del futuro. Recuperado el 12-12-2018 de: <https://bit.ly/2T8bwim>
- Fig. 7.2 Fotografía de bloques y placas de arcilla polimerizada Tipo A fabricadas en la campaña experimental en el Laboratorio de materiales de la Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (EPSEB).

Bibliografía

Bibliografía citada:

- Achal, V., Mukherjee, A., Kumari, D., & Zhang, Q. (2015). Earth-Science Reviews Biomineralization for sustainable construction – A review of processes and applications. *Earth Science Reviews*, 148, 1–17. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.008>.
- Alam, I., Naseer, A., Shah, A. A. (2015). Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas. *Construction and Building Materials*, 77, 154–159. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046>.
- Alam, I., Naseer, A., Shah, A. A. (2015). Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas. *Construction and Building Materials*, 77, 154–159. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046>.
- Alban, Fred (1999). *Materiales poliméricos* (2ª edición). Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle. (n/d).
- Asociación Española de Normalización y Certificación (1986: ...). (1999). *Geotecnia : ensayos de campo y de laboratorio*. Madrid : AENOR. Recuperado en Octubre 2017 de: http://catalog.upc.edu/record=b1267849-S1*cat pp. 99-107.
- Aubert, J. E., Maillard, P., Morel, J. C., & Al Rafii, M. (2015). Towards a simple compressive strength test for earth bricks?. *Materials and Structures*, (APRIL). <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.4641.4242>.
- Autef, A., Joussein, E., Gasgnier, G., & Rossignol, S. (2013). Role of the silica source on the geopolymerization rate: A thermal analysis study. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 366(1), 13–21. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.01.034>.
- Avrami, E., Guillaud, H., & Hardy, M. (2008). *Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*. (A. Escobar, Ed.). Institute, The Getty Conservation. Los Angeles. Recuperado en Octubre 2016 de: https://getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/terra_lit_review.pdf#page=34. p XI.
- Barsoum, M.W., Ganguly, A. and Hug, G.: Microstructural evidence of reconstituted limestone blocks in the Great Pyramids of Egypt. *J. Am. Ceram. Soc.* 89(12), 3788-3796 (2006).
- Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). General introduction: Clays, clay minerals, and clay science. *Developments in Clay Science*, vol.5, p.1–19. Última consulta 17/07/2018: <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00001-8>.
- Bergaya, F., Theng, B. K. G., & Lagaly, G. (2006). Chapter 7: Modified Clays and Clay Minerals. *Developments in Clay Science*, 1(C), 261. Recuperado en octubre 2017 de: [http://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01007-X](http://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01007-X).
- Blaakmeer J. 1994. Diabind: an alkali-activated slag fly ash binder for acid-resistant concrete. *Adv. Cem. Based Mater.* 1:275–76.
- Blondet, M., & Aguilar, R. (2007). Seismic Protection of Earthen Buildings. In *Conferencia Internacional en ingeniería sísmica*. (pp. 482–777). Lima. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://www.cismid-uni.org>.
- Borges, P. H. R., Banthia, N., Alcamand, H. A., Vasconcelos, W. L., & Nunes, E. H. M. (2016). Performance of blended metakaolin/blastfurnace slag alkali-activated mortars. *Cement and Concrete Composites*, 71, 42–52. p.42. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.008>.
- Borges, P. H. R., Banthia, N., Alcamand, H. A., Vasconcelos, W. L., & Nunes, E. H. M. (2016). Performance of blended metakaolin/blastfurnace slag alkali-activated mortars. *Cement and Concrete Composites*, 71, 42–52. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.008>.
- Bouzón Orgeira, N. (2015). *Activadores Alcalinos Alternativos a Partir De La Ceniza De Cáscara De Arroz Para La Preparación De Geopolímeros*. Doctorado. Universitat Politècnica de València. p.67. Recuperado en octubre 2016 de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/54126>.
- Calderón P., J. C. (2013). *Tecnologías para la fabricación de bloques de tierra de gran resistencia*. Tesis de máster. Tecnología de la Arquitectura la Edificación y el Urbanismo. Universidad Politècnica de Catalunya.
- Cox, P. A. (1995). *The elements on earth : inorganic chemistry in the environment*. Oxford University Press. Recuperado en octubre 2017 de: <https://bit.ly/2JWMIR>.
- Damme, H. Van, & Houben, H. (2017). Earth concrete . Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research Journal*.
- Damme, H. Van, & Houben, H. (2017). Earth concrete . Stabilization revisited. *Cement and Concrete Research Journal*.
- Davidovits, J. (1982) Mineral polymers and methods of making them, U.S. Patent 4,349,386.
- Davidovits, J. (1984) Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process, U.S. Patent 4,472,199.
- Davidovits, J. (1991) Geopolymers – Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656. doi:10.1007/BF01912193.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656. p.1. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/BF01912193>.
- Davidovits, J. (2005) Geopolymer, *Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of World Congress Geopolymer 2005*. Saint-Quentin, France.
- Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère.
- Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère. p.04.
- Davidovits, J. (2015). *Geopolymer, Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin: Institut Géopolymère. p. 20.
- Davidovits, J. and Davidovits, F.: *The Pyramids: An Enigma Solved*. 2nd Revised Ed. Éditions J. Davidovits, Saint-Quentin, France (2001).
- Davidovits, J. and Orlinski, J. (1988) *Proceedings of Geopolymer '88 – First European Conference on Soft Mineralurgy*. Compeigne, France.
- Davidovits, J., Davidovits, R. and James, C. (1999) *Proceedings of Géopolymère '99 – Second International Conference*. Saint-Quentin, France.
- Deer, R. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1997). *Rock-forming minerals*. Vol. 5B, Non-silicates. Geological Society. p.224. Recuperado en octubre 2017 de: <https://bit.ly/2zHQNUW>.
- Departamento de Tecnología de la Construcción. *Geología Aplicada, Documento online sobre Arcillas*, Universidad de Coruña. (2017). Última consulta 17/07/2018: <https://bit.ly/2LsQE0>.
- Díaz Rodríguez, L. A.; Tordecillas, R. (2002). Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. [en línea] 41(5), p. 459–470. p 460. Disponible en: <http://boletines.secv.es/upload/20090429105008.200241459.pdf>.
- Dietrich, R. V., & Skinner, B. J. (1979). *Rocks and rock minerals*. Wiley. Recuperado en octubre 2017 de: https://books.google.es/books/about/Rocks_and_Rock_Minerals.html?id=noSAQAAlAAJ&redir_esc=y.
- Dominguez, J., & Schiffer, I. (1995). "Las arcillas: el barro noble" en: *La ciencia para todos*. [en línea] México: Fondo de Cultura Económica, vol.3: Química.

- Ultima consulta 17/07/2018: <https://bit.ly/2z197zT> .
- Dominguez, J., & Schifter, I. (1995). "Las arcillas: el barro noble" en: La ciencia para todos. [en línea] México: Fondo de Cultura Económica, vol.3: Química. Recuperado en octubre 2016 de: 17/07/2018: <https://bit.ly/2z197zT>
 - Duxson, P., & Provis, J. L. (2008). Designing precursors for geopolymer cements. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(12), 3864–3869. p.12. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02787>.
 - Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. p.2917. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0637z>.
 - Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). op. cit. pp. 2917-2918.
 - Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). op. cit. p. 2918.
 - Esaifan, M., Rahier, H., Barhoum, A., Khoury, H., Hourani, M., & Wastiels, J. (2015). Development of inorganic polymer by alkali-activation of untreated kaolinitic clay: Reaction stoichiometry, strength and dimensional stability. *Construction and Building Materials*, 91, 251–259. p.251. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.034>.
 - Esaifan, M., Rahier, H., Barhoum, A., Khoury, H., Hourani, M., & Wastiels, J. (2015). Development of inorganic polymer by alkali-activation of untreated kaolinitic clay: Reaction stoichiometry, strength and dimensional stability. *Construction and Building Materials*, 91, 251–259. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.034>.
 - F. Pacheco-Torgal, M. V. Diamanti, A. N. et. al. (2013). Nanotechnology in eco-efficient construction. (Woodhead Publishing Limited, Ed.)
 - Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1–3), 111–119. p118. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.015>.
 - Formosa, J. (2012). Tesis: Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de Barcelona. p. 70.
 - Franco Urquiza, E.A.; Maspoch Rulduà, M.L. (2009). Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos. En: *Ingenierías*. [en línea] 12(44), p. 35–41. p37. Ultima consulta 17/07/2018: <https://bit.ly/2uFlh6>.
 - Gallipoli, D., Bruno, A. W., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). A geotechnical perspective of raw earth building. *Acta Geotechnica*, 12(3), 463–478. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1007/s11440-016-0521-1>.
 - Gallipoli, D., Bruno, A. W., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). A geotechnical perspective of raw earth building. *Acta Geotechnica*, 12(3), 463–478. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1007/s11440-016-0521-1>.
 - Gallipoli, D., Bruno, A. W., Perlot, C., & Mendes, J. (2017). op. cit.
 - Gartner E. Industrially interesting approaches to low-CO2 cements. *Cem Concr Res* 2004;34:1489–98.
 - Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO2" cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489–1498. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>.
 - Glukhovskiy, V.D.: Ancient, modern and future concretes. In: Krivenko, P.V. (ed.) *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine, vol. 1, pp. 1–9. VIPOL Stock Company (1994)p.32.
 - Granizo, M.L., Blanco-Varela, M.T., Palomo, A., 2000. Influence of the starting kaolin on alkali-activated materials based on metakaolin. Study of the reaction parameters by isothermal conduction calorimetry. *Journal of Materials Science* 35, 6309–6315.
 - Grim, Ralph E. (1968). *Clay Mineralogy*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill.
 - Grimshaw, Rex W.; Broadhead Searle, A. (1990). *The chemistry and physics of clays and allied ceramic materials*. 4th ed. Herndon, VA: TechBooks. p.99.
 - Guettala, A., Abibsi, A., & Houari, H. (2006). Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. *Construction and Building Materials*, 20(3), 119–127. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.001>.
 - Guo, W., Wu, G., Wang, J., Wen, Z., & Yin, S. (2008). Preparation and performance of geopolymers. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 23(3), 326–330. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/s11595-007-3326-0>.
 - H. Xu, Geopolymerisation of Aluminosilicate Minerals, PhD Thesis, Department of Chemical Engineering, University of Melbourne, Australia, (2001) p.6.
 - Hall, M. R., Lindsay, R., & Krayenhoff, M. (2012). *Modern earth buildings : materials, engineering, construction and applications*. (ELSEVIER, Ed.) (1st Edition). Woodhead Publishing.
 - Heath, A., Walker, P., Fourie, C., & Lawrence, M. (2009). Compressive strength of extruded unfired clay masonry units. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, 162(3), 105–112. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1680/coma.2009.162.3.105>.
 - Heller-Kallai, L., 2006. Thermally modified clay minerals. In: Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G. (Eds.), *Handbook of Clay Science*. Developments in Clay Science. Elsevier, Amsterdam, pp. 289–308.
 - Hermann E, Kunze C, Gatzweiler R, Kiebig G, Davitovits J (1999) In: *Proceedings of Geopolymers*. p. 211.
 - Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth construction : a comprehensive guide*. London : Intermediate Technology Publications. Recuperado en Octubre 2016 de: http://catalog.upc.edu/record=b1189617-S1*cat pp. 73-103.
 - Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G. L., Djétéli, G., & Blanchart, P. (2013). Kaolin-based geopolymers: Effect of mechanical activation and curing process. *Construction and Building Materials*, 42, 105–113. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.069>.
 - Hounsi, A. D., Lecomte-Nana, G., Djétéli, G., Blanchart, P., Alowanou, D., Kpelou, P., et. al. (2014). How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural characteristic of kaolin-based geopolymers. *Ceramics International*, 40(7 PART A), 8953–8962. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.02.052>.
 - Ilic BR, Mitrovic AA, Milicic LR. Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin. *Hem Ind* 2010;64:351–6.
 - Jiménez Salas, J. A., Justo Alpañés, J. L., & Serrano González, A. A. (1971). *Geotécnica y cementos*. Madrid : Rueda. p. 14.
 - Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review. *Journal of Materials Science*, 42(3), 729–746. p.731. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>
 - Kong DLY, Sanjayan JG, Sagoe-Crentsil K. Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures. *J Mater Sci* 2008;43:824–31.
 - Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2008). Activación alcalina de cenizas volantes. Relación entre el desarrollo mecánico resistente y la composición química de la ceniza. *Materiales de Construcción*, 58(291), 35–52. . p. 36. Recuperado en octubre 2017 de: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/101/140> .
 - I. Eloundou, T. Joffroy. (2013). Earthen Architecture in today's World, in *Proceedings of the UNESCO International Colloquium on the Conservation of World Heritage Earthen Architecture*, UNESCO Publishing. Recopilado de: Damme, H. Van, & Houben, H. (2017). *Earth concrete . Stabilization revisited*. Cement and Concrete Research Journal. p.2.
 - Lagaly, G., Ogawa, M., & Dékány, I. (2006). Chapter 7.3 Clay Mineral Organic Interactions. *Developments in Clay Science*, 1, 309–377. Recuperado en octubre 2017 de: [http://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01010-X](http://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01010-X).
 - Lee, N. K., Khalid, H. R., & Lee, H. K. (2016). Synthesis of mesoporous geopolymers containing zeolite phases by a hydrothermal treatment. *Microporous and Mesoporous Materials*, 229, 22–30. p. 22. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.04.016>.
 - Lemougna, P. N., MacKenzie, K. J. D., & Melo, U. F. C. (2011). Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics International*, 37(8), 3011–3018. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.002>.
 - Lemougna, P. N., MacKenzie, K. J. D., Melo, U. F. C. (2011). Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics International*, 37(8), 3011–3018. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.05.002>.
 - Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629. p.596. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>.

- Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629. p. 597. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>.
- Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). op. cit. p. 597.
- Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). op. cit.
- Liew, Y. M., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A. M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C. M., & Heah, C. Y. (2012). Processing and characterization of calcined kaolin cement powder. *Construction and Building Materials*, 30, 794–802. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.079>.
- Liew, Y. M., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, et. al.. (2011). Influence of solids-to-liquid and activator ratios on calcined kaolin cement powder. *Physics Procedia*, 22, 312–317. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.049>.
- Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD. 2011. Supplementary cementitious materials. *Cem. Concr. Res.* 41:1244–1256.
- Louati, S., Baklouti, S., & Samet, B. (2016). Acid based geopolymerization kinetics: Effect of clay particle size. *Applied Clay Science*, 132–133, 571–578. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.007>.
- Lukey, G. C. (2002) Proceedings of Geopolymers 2002 – Turn Potential into Profit, Melbourne, Australia.
- M.C. Blandy, and J.A. Blandy. (1955). *De Natura Fossilium (Textbook of Mineralogy) by Georgius Agrícola* » Translated from the First Latin Edition of 1546. Geological Society of America. Special Paper, 63 (1955).
- Mackenzie, K. J. D. (2009). Utilisation of non-thermally activated clays in the production of geopolymers. In *Geopolymers* (pp. 294–314). Recuperado en octubre 2017 de: Elsevier. <http://doi.org/10.1533/9781845696382.2.294>.
- Maniatis, V., & Walker, P. (2003). A Review of Rammed Earth Construction. In D. of A. & C. Engineering (Ed.), DTI Project Report (p. 80). Bath: University of Bath. Recuperado en Octubre 2016 de: <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/a-review-of-rammed-earth-construction>.
- Miccoli, L., Müller, U., & Fontana, P. (2014). Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials*, 61, 327–339. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>.
- Miccoli, L., Müller, U., & Fontana, P. (2014). Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials*, 61, 327–339. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>.
- Minke, G. (2001). Manual de construcción en tierra : la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura tradicional. Montevideo : Nordan-Comunidad. Recuperado en Octubre 2016 de: http://catalogue.upc.edu/record=b1323040-S1*cat pp. 47-59
- Minke, G. (2009). *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*. Basel [etc.] : Birkhäuser. Recuperado en Octubre 2016 de: http://catalogue.upc.edu/record=b1360313-S1*cat, 72-76.
- Muñoz, J. F., Easton, T., & Dahmen, J. (2015). Using alkali-activated natural aluminosilicate minerals to produce compressed masonry construction materials. *Construction and Building Materials*, 95, 86–95. p.86. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.144>.
- Murray, H. H. (Haydn H.) (2007). *Applied clay mineralogy : occurrences, processing, and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite, and common clays*. Amsterdam, Boston [etc.] : Elsevier. Última consulta 17/07/2018: <https://bit.ly/2zKRj9> . p 9
- Nazari, A., Sanjayan, J. G. (2017). *Handbook of Low Carbon Concrete*. Butterworth-Heinemann. p.195. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128045244>.
- Nazari, A., Sanjayan, J. G. (2017). *Handbook of Low Carbon Concrete*. Butterworth-Heinemann. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128045244>. p.195.
- Norma UNE-EN ISO 12680-1: “Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso” (2007).
- Pacheco-Torgal, F. (2015). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. United Kingdom: Woodhead Pub.
- Pacheco-Torgal, F. (2015). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. United Kingdom: Woodhead Pub. p. 02.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1305–1314. p.02. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>.
- Palomo, A. and Glasser, F. P. (1992) Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin. *British Ceramic Transactions and Journal*, 91, 107–112.
- Palomo, A., Krivenko, P., Kavalerova, E., & Maltseva, O. (2014). A review on alkaline activation : new analytical perspectives. *Materiales de Construcción*, 64(31). p.02.
- Pan, W. (2012). Prefabrication and Automation in Rammed Earth Building Construction. In *Proceedings of the CIB IAARC W119, Workshop 2012* (pp. 57–61). Munich, Germany. Recuperado en Octubre 2016 de: <https://bit.ly/2FkddBx>.
- Pastor Quiles, María (2016). Aproximación al estudio arqueológico de la construcción con tierra y a su aplicación a la arquitectura prehistórica, V Jornadas de Investigación de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Alicante. Universidad de Alicante. Facultad de Filosofía y Letras. Alicante.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers : structure, processing, properties and industrial applications*. Woodhead. p 302.
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. CRC Press, Woodhead Publishing, Great Abington, Cambridge, UK. p. 01. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1533/9781845696382>.
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. CRC Press, Woodhead Publishing, Great Abington, Cambridge, UK. p. 294. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1533/9781845696382>.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials (Vol. 13)*. p. 36. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>.
- Provis, J. L., van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. CRC Press, Woodhead Publishing, Great Abington, Cambridge, UK. <http://doi.org/10.1533/9781845696382>
- Provis, J. L.; Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials RILEM State-of-the-Art Report, TC 224-AAM. (RILEM, Ed.) (Vol. 13)*. Springer. p. 8. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>.
- Rábano, I., Mata-Perelló, J. M., & Moreno-Eiris, E. (2006). Patrimonio geológico y minero : su caracterización y puesta en valor. Instituto Geológico y Minero de España. . p. 236. Retrieved from <https://bit.ly/2SGe6He>.
- Recuperado en Octubre 2017 de: <http://www.architectureanddesign.com.au/news/uq-s-global-change-institute-is-first-to-use-cement>
- Recuperado en Octubre 2017 de: <http://www.incar.csic.es/porosimetria-de-mercurio>.
- Recuperado en Octubre 2017 de: <https://bit.ly/2M5EABO>.
- Recuperado en Octubre 2017 de: <https://bit.ly/2M7bp12>.
- Recuperado en Octubre 2017 de: <https://bit.ly/2vKeYjp>.
- Recuperado en Octubre 2017 de: <https://bit.ly/2vMAwMo>.
- Recuperado en Octubre 2017 de: <https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/>
- Recuperado en Octubre de 2017 de: <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0042285#Wx6iri0rxZ0>.
- Recuperado en Octubre de 2017 de: <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0042285#Wx6iri0rxZ0>.
- Recuperado en Octubre de 2017 de: <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0051621&pdf=#.WwQ8Gy8rzX8>.
- Recuperado en Octubre de 2017 de: <https://bit.ly/2KWcIeF> .
- Recuperado en Octubre de 2017 de: <https://bit.ly/2vK6KsB>.
- Review, A. L., Force, A. I. R., & Directorate, M. (2012). Alkali-activated geopolymers: a literature review. Air Force USA. Airbase Technologies Division, Air

- Force Research Laboratory. p.09.
- Rosell, J. R., & Cantalapiedra, I. R. (2011) cita a Ricardo, M. y Baettig, P.: "Determinación del módulo de elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales", *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 3(1-2), pp. 44-51 (2001).
 - Rosell, J. R., & Cantalapiedra, I. R. (2011). Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento Simple method of dynamic Young ' s modulus determination in lime and cement mortars. *Materiales de Construcción*, 301, 39–48. <http://doi.org/10.3989/mc.2010.53509>.
 - Rubio, S. A., & Lopez, M. (2012). *Minerales y Rocas*. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://www2.montes.upm.es/Dptos/dsrn/Edafologia/aplicaciones/GIMR/index.php>.
 - Ruiz-Santaquitería, C., Fernández-Jiménez, A., Skibsted, J., & Palomo, A. (2013). Clay reactivity: Production of alkali activated cements. *Applied Clay Science*, 73(1), 11–16. p. 11. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2012.10.012>.
 - Schroeder, H. (2016). *Sustainable Building With Earth* (Springer). Switzerland. p. 02.
 - Seiffarth, T., Hohmann, M., Posern, K., & Kaps, C. (2013). Effect of thermal pre-treatment conditions of common clays on the performance of clay-based geopolymeric binders. *Applied Clay Science*, 73(1), 35–41. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.010>.
 - Sinha, R., Lennartsson, M., & Frostell, B. (2016). Environmental footprint assessment of building structures: A comparative study. *Building and Environment*, 104, 162–171. p.162 <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.012>.
 - Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2013). Characterization of alkali activated kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 75–76, 120–125. p.120. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.005>.
 - Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2013). Characterization of alkali activated kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 75–76, 120–125. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.005>.
 - Taylor, M., Tam, C., & Gielen, D. (2006). Energy Efficiency and CO 2 Emissions from the Global Cement Industry. IEA-WBCSD Cement Energy Efficiency Industry Workshop, (September). p. Retrieved from http://www.iea.org/work/2006/cement/taylor_background.pdf.
 - Tironi, A., Castellano, C. C., Bonavetti, V., Trezza, M. A., Scian, A. N., & Irassar, E. F. (2015). Blended Cements Elaborated with Kaolinitic Calcined Clays. *Procedia Materials Science*, 8, 211–217. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.066>.
 - Torrijo Echarri, F. J., & Cortés Gimeno, R. (2007). *Los suelos y las rocas en ingeniería geológica: herramientas de estudio*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. p. 05.
 - United Nations. (2009). *Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers*. 1–62. p. 3. <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
 - USGS. (2018). *Mineral Industry Surveys - PLATINUM-GROUP METALS*, (June 2017). Retrieved from <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mis-201802-plati.pdf>.
 - Venkatarama Reddy, B. V., & Latha, M. S. (2014). Retrieving clay minerals from stabilised soil compacts. *Applied Clay Science*, 101, 362–368. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2014.08.027>.
 - Venkatarama Reddy, B. V., & Latha, M. S. (2014). Retrieving clay minerals from stabilised soil compacts. *Applied Clay Science*, 101, 362–368. Recuperado en Octubre 2016 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2014.08.027>.
 - Wan, Q., Rao, F., & Song, S. (2017). Reexamining calcination of kaolinite for the synthesis of metakaolin geopolymers - roles of dehydroxylation and recrystallization. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 460, 74–80. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.01.024>.
 - Wastiels J, Wu X, Faignet S, Pailfoort G. 1994. Mineral polymer based on fly ash. *J. Resour. Manag. Technol.* 22:135–41.
 - Weaver, C. E., Pollard, L. D. (1973). *The chemistry of clay minerals*. Amsterdam [etc.] : Elsevier Scientific. p 131.
 - Weng, L., Sagoe-Crentsil, K., Brown, T., & Song, S. (2005). Effects of aluminates on the formation of geopolymers. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 117(2), 163–168. p.163. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.mseb.2004.11.008>.
 - What is a geopolymer? (5 Abril 2006, actualizado: Agosto 17, 2012). Recuperado en octubre 2017 de: <https://www.geopolymer.org/science/introduction/>.
 - Xie, Z., & Xi, Y. (2001). Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1245–1249. pp.1245–1249. Recuperado en octubre 2017 de: [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00571-3](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00571-3).
 - Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). op. cit. p. 249.
 - Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *Mineral Processing*. p.
 - Zhang, G., He, J., & Gambrell, R. P. (2010). Synthesis, Characterization, and Mechanical Properties of Red Mud-Based Geopolymers and Mechanical Properties of Red Mud – Based Geopolymers. *Journal of the Transportation Research Board*, (December). p. 02. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.3141/2167-01>.
 - Zuhua, Z., Xiao, Y., Huajun, Z., & Yue, C. (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. *Applied Clay Science*, 43(2), 218–223. Recuperado en octubre 2017 de: <http://doi.org/10.1016/j.clay.2008.09.003>.

Bibliografía consultada:

- Al Muhit, B. A., Foong, K. Y., Alengaram, U. J., & Mohd, Z. J. (2013). Geopolymer concrete : A building material for the future. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 13(1), 2013.
- Al., E. by M. R. H. et. (2012). *Modern earth buildings; materials, engineering, constructions and applications*. (Woodhead Publishing Limited, Ed.)Reference and Research Book News (Vol. 27). Portland: Ringgold Inc.
- Alavez-Ramírez, R., Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D. C., & Gochi-Ponce, Y. (2012). The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Construction and Building Materials*, 34, 296–305. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>
- Aldabsheh, I., Khoury, H., Wastiels, J., & Rahier, H. (2015). Dissolution behavior of Jordanian clay-rich materials in alkaline solutions for alkali activation purpose. Part I. *Applied Clay Science*, 115, 238–247. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2015.08.004>
- Alejandra, V. M., Ruby, M. G., & David, R. E. (2015). Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas Microstructure Assessment of Metakaolin Based-Geopolymers Produced with Alternative Silica Sources Exposed to High Temperature. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, (número 1).
- Allali, F., Joussein, E., Kandri, N. I., & Rossignol, S. (2016). The influence of calcium content on the performance of metakaolin-based geomaterials applied in mortars restoration. *Materials and Design*, 103, 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.028>
- Alonso, S., & Palomo, A. (2001). Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Materials Letters*, 47(1–2), 55–62. [http://doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00212-3](http://doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00212-3)
- Alonso, S., & Palomo, A. (2001). Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide-Cmetakaolin solid mixture. *Cement and Concrete Research*, 31, 6.
- Alshaaer, M. (2013). Two-phase geopolymerization of kaolinite-based geopolymers. *Applied Clay Science*, 86, 162–168. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2013.10.004>
- Anggarini, U., & Sukmana, N. C. (2016). Synthesis and characterization of geopolymer from bottom ash and rice husk ash. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 107, 012022. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/107/1/012022>
- Anggraini, V., Huat, B. B. K., Asadi, A., & Nahazanan, H. (2015). Effect of Coir Fibers on the Tensile and Flexural Strength of Soft Marine Clay. *Journal of*

- Natural Fibers, 12(2), 185–200. <http://doi.org/10.1080/15440478.2014.912973>
- Ashour, T., Korjenic, A., & Korjenic, S. (2015). Equilibrium moisture content of earth bricks biocomposites stabilized with cement and gypsum. *Cement and Concrete Composites*, 59, 18–25. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.005>
 - Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., & Wu, W. (2015). Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy and Buildings*, 104, 139–146. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.016>
 - Ashour, T., Raucherer, M., & Wu, W. (2011). The influence of cement, gypsum and lime on the compressive strength of unfired earth bricks. *Geophysical Research Abstracts*, 13, 7617–7617.
 - Assi, L., Ghahari, S. A., Deaver, E. E., Leaphart, D., & Ziehl, P. (2016). Improvement of the early and final compressive strength of fly ash-based geopolymers concrete at ambient conditions. *Construction and Building Materials*, 123, 806–813. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.069>
 - Aubert, J. E., & Gasc-Barbier, M. (2012). Hardening of clayey soil blocks during freezing and thawing cycles. *Applied Clay Science*, 65–66, 1–5. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2012.04.014>
 - Aubert, J. E., Fabbri, A., Morel, J. C., & Maillard, P. (2013). An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa. *Construction and Building Materials*, 47, 366–369. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.068>
 - Aymerich, F., Fenu, L., Francesconi, L., & Meloni, P. (2016). Fracture behaviour of a fibre reinforced earthen material under static and impact flexural loading. *Construction and Building Materials*, 109, 109–119. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.046>
 - Bachar, M., Azzouz, L., Robehi, M., & Mezghiche, B. (2015). Characterization of a stabilized earth concrete and the effect of incorporation of aggregates of cork on its thermo-mechanical properties: Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials*, 74, 259–267. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.106>
 - Barbosa, V. F. F. (1), M., & Kenneth J. D. (2), Thaumaturgo, C. (1). (1999). Synthesis and Characterization of Sodium Polysilicate Inorganic Polymer Based on Alumina and Silica. *Geopolymer International Conference*, 2, 65–78. [http://doi.org/10.1016/S1466-6049\(00\)00041-6](http://doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6)
 - Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay soils.pdf. *Engineering Geology*, 42, 33.
 - Bergaya, F., & Lagaly, G. (2006). Chapter 1 General Introduction: Clays, Clay Minerals, and Clay Science. *Developments in Clay Science*, 1, 1–18. [http://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01001-9](http://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01001-9)
 - Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). *Handbook of clay science*. Elsevier.
 - Bestraten, S., Hormias, E., & Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI—Earthen Construction in the 21st Century. *Informes de La Construcción*, 63(523), 5–20. <http://doi.org/10.3989/ic.10.046>
 - Bondar, D., Lynsdale, C. J., & Milestone, N. B. (2013). Alkali-Activated Natural Pozzolan Concrete as New Construction Material. *ACI Materials Journal*, 110(3), 331–337. <http://doi.org/10.14359/51685667>
 - Bouassria, K., Ammari, A., Tayyibi, A., Bouabid, H., & Zerouaoui, J. (2015). The effect of lime on aluminosilicate and cement on the behavior of compressed earth blocks. *J. Mater. Environ.*, 6(12), 3430–3435.
 - Buchwald, A., Hohmann, M., Posern, K., & Brendler, E. (2009). The suitability of thermally activated illite/smectite clay as raw material for geopolymer binders. *Applied Clay Science*, 46(3), 300–304. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2009.08.026>
 - Burciaga-Diaz, O., Escalante-García, J. I., & Magallanes-Rivera, R. X. (2015). Resistencia a la compresión y evolución microestructural de geopolímeros base metacaolín expuestos a alta temperatura. *Revista ALCONPAT*, 58–73. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000100006&lang=pt
 - Cabeza, L. F., Barreneche, C., & Miro, L. (2013). Affordable construction towards sustainable buildings: review on embodied energy in building materials. *Environmental Sustainability*. <http://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.05.005>
 - Cabeza, L. F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J. M., Barriol, E., & Fernández, A. Inés. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 536–542.
 - Cagnon, H., Aubert, J. E., Coutand, M., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208–217. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>
 - Champiré, F., Fabbri, A., Morel, J., Wong, H., & McGregor, F. (2016). Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Construction and Building Materials*, 110(in revision), 70–78. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.027>
 - Chang, R. (2002). *Química*. (W. COLLEGE, Ed.) (Séptima). Mexico.
 - Chen, X., Zhu, G. R., Wang, J., & Chen, Q. (2018). Effect of polyacrylic resin on mechanical properties of granulated blast furnace slag based geopolymer. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 481(July), 4–9. <http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.07.003>
 - Cid-Falceto, J., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2012). Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests. *Construction and Building Materials*, 37, 738–745. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.019>
 - Cid, J., Mazarrón, F. R., & Cañas, I. (2011). Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de La Construcción*, 63(523), 159–169. <http://doi.org/10.3989/ic.10.011>
 - Collins, F. G., Turner, L. K., & Collins, F. G. (2017). Carbon dioxide equivalent (CO₂e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43(January 2013), 125–130. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
 - Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., & Williams, J. (2015). Effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of soil building blocks. *Construction and Building Materials*, 83, 314–319. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.039>
 - Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., & Williams, J. B. (2015). Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Construction and Building Materials*, 101, 797–809. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.069>
 - Das, S. K., Mohapatra, A. K., & Rath, A. K. (2014). Geo-polymer Concrete – Green Concrete for the Future — A Review. *International Journal of Civil Engineering Research*, 5(1), 21–28.
 - Davidovits, J. (2015). How to cite this paper: False Values on CO₂ Emission for Geopolymer Cement / Concrete published in Scientific Papers The Manufacture of Geopolymer Cement / Concrete. *Geopolymer Institute Library*, 1–9.
 - Davidovits, P. J. (2002). 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. *Market Trends and Potential Breakthroughs*. *Geopolymer 2002 Conference*, 1–16. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
 - Davidovits, P. J. (2002). Environmentally Driven Geopolymer Cement Applications. *A Heavy metals waste encapsulation (1987)*. *Geopolymer Institute Library*, (6), 1–9.
 - De Wolf, C., Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. *Energy and Buildings*, 140, 68–80. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.075>
 - Deboucha, S., & Hashim, R. (2011). A review on bricks and stabilized compressed earth blocks. *Scientific Research and Essays*, 6(3), 499–506. <http://doi.org/10.5897/SRE09.356>
 - Delgado, M. C. J., & Guerrero, I. C. (2006). Earth building in Spain. *Construction and Building Materials*, 20(9), 679–690. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.006>
 - Dietel, J., Warr, L. N., Bertmer, M., Steudel, A., Grathoff, G. H., & Emmerich, K. (2017). The importance of specific surface area in the geopolymerization of heated illitic clay. *Applied Clay Science*, 139, 99–107. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.001>
 - Diop, M. B., & Grutzeck, M. W. (2008). Low temperature process to create brick. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1114–1121. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.004>
 - Diop, M. B., Grutzeck, M. W., & Molez, L. (2011). Comparing the performances of bricks made with natural clay and clay activated by calcination and addition of sodium silicate. *Applied Clay Science*, 54(2), 172–178. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2011.08.005>
 - Donkor, P., & Obonyo, E. (2015). Earthen construction materials: Assessing the feasibility of improving strength and deformability of compressed earth blocks

- using polypropylene fibers. *Materials and Design*, 83, 813–819. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.017>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
 - Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Deventer, J. S. J. Van. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*, 37, 1590–1597. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>
 - Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., Mallicoat, S. W., Kriven, W. M., & Van Deventer, J. S. J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 269(1–3), 47–58. <http://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>
 - Elert, K., Pardo, E. S., & Rodríguez-Navarro, C. (2015). Alkaline activation as an alternative method for the consolidation of earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 16(4), 461–469. <http://doi.org/10.1016/j.culher.2014.09.012>
 - Esaifan, M., Khoury, H., Aldabshah, I., Rahier, H., Hourani, M., & Wastiels, J. (2015). Hydrated lime/potassium carbonate as alkaline activating mixture to produce kaolinitic clay based inorganic polymer. *Applied Clay Science*, 126, 278–286. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2016.03.026>
 - Fletcher, R. A., Mackenzie, K. J. D., Nicholson, C. L., Al, O. S. O., & Si, O. S. O. (2005). The composition range of aluminosilicate geopolymers. *Journal of the European Ceramic Society*, 25, 1471–1477. <http://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.06.001>
 - Fontaine, L., & Anger, R. (2009). *Bâtir en terre Du grain de sable à l'architecture*. Belin. Retrieved from <https://www.belin-editeur.com/batir-en-terre>
 - Fouchal, F., Gouny, F., Maillard, P., Ulmet, L., & Rossignol, S. (2015). Experimental evaluation of hydric performances of masonry walls made of earth bricks, geopolymer and wooden frame. *Building and Environment*, 87, 234–243. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.036>
 - Galan-Marin, C., Rivera-Gomez, C., & Petric, J. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1462–1468. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.008>
 - Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489–1498. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
 - Gomes, E., & Figueiredo, F. M. (2006). Activación alcalina de metacaolín. Efecto de la adición de silicato soluble y de la temperatura de curado. *Cerámica y Vidrio*, 149(13), 35–43.
 - Gouny, F., Fouchal, F., Pop, O., Maillard, P., & Rossignol, S. (2013). Mechanical behavior of an assembly of wood – geopolymer – earth bricks. *Construction and Building Materials*, 38, 110–118. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.113>
 - Habert, G., & Roussel, N. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 397–402. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.001>
 - Habert, G., D'Espinoise De Lacaillerie, J. B., & Roussel, N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229–1238. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>
 - Hajimohammadi, A., & van Deventer, J. S. J. (2015). Dissolution behaviour of source materials for synthesis of geopolymer binders: A kinetic approach. *International Journal of Mineral Processing*, 153, 80–86. <http://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.05.014>
 - Haven, N. (1995). The effect of pH on kaolinite dissolution rates and on activation energy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(6), 1037–1052.
 - Heah, C. Y., & Hazlinda, K. (2011). Potential application of kaolin without calcine as greener concrete: a review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(7), 1026–1035. Retrieved from <http://dspace.unimap.edu.my/dspace/handle/123456789/19699>
 - Heah, C. Y., Kamarudin, H., Al Bakri, A. M. M., Binhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., ... Liew, Y. M. (2012). Effect of Mechanical Activation on Kaolin-Based Geopolymers. *Advanced Materials Research*, 479–481, 357–361. <http://doi.org/10.4028/>
 - Heah, C. Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A. M., Binhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., ... Liew, Y. M. (2011). Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers. *Physics Procedia*, 22(June), 305–311. <http://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.048>
 - Heah, C. Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A. M., Binhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., ... Liew, Y. M. (2013). Kaolin-based geopolymers with various NaOH concentrations. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 20(3), 313–322. <http://doi.org/10.1007/s12613-013-0729-0>
 - Heah, C. Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A. M., Binhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., ... Liew, Y. M. (2012). Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 35, 912–922. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.102>
 - Heath, A., Paine, K., & McManus, M. (2014). Minimising the global warming potential of clay based geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 78, 75–83. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.046>
 - Heathcote, K. A. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and Building Materials*, 9(3), 185–189. [http://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00035-E](http://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00035-E)
 - Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 30, 100–116. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>
 - Hendriks, Worell, E., De Jager, D., Blok, K., & Riemer, P. (2004). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. In *Greenhouse gas control technologies* (pp. 1–11). Retrieved from <http://www.wbcsdcement.org/pdf/tf1/prghgt42.pdf>
 - Hu, N., Bernsmeier, D., Grathoff, G. H., & Warr, L. N. (2017). The influence of alkali activator type, curing temperature and gibbsite on the geopolymerization of an interstratified illite-smectite rich clay from Friedland. *Applied Clay Science*, 135, 386–393. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.021>
 - Hwang, C. L., & Huynh, T. P. (2015). Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 101, 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.025>
 - Ibáñez Asensio, nombre, Blanquer, G., Manuel, J., Ramón, M., & Producción Vegetal, D. (2017). Filosilicatos 1:1. Retrieved November 16, 2017, from [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13595/Filosilicatos 1:1.pdf?sequence=3](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13595/Filosilicatos%201:1.pdf?sequence=3)
 - Ibáñez Asensio, nombre, Blanquer, G., Manuel, J., Ramón, M., & Producción Vegetal, D. (2017). Filosilicatos 2:1. Retrieved November 16, 2017, from [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12885/Filosilicatos 2:1.pdf?sequence=3](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12885/Filosilicatos%202:1.pdf?sequence=3)
 - Illampas, R., Ioannou, I., & Champis, D. C. (2014). Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation. *Construction and Building Materials*, 53, 83–90. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.103>
 - Izemouren, O., Guettala, A., & Guettala, S. (2015). Mechanical Properties and Durability of Lime and Natural Pozzolana Stabilized Steam-Cured Compressed Earth Block Bricks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(5), 1321–1333. <http://doi.org/10.1007/s10706-015-9904-6>
 - Jafari Nadoushan, M., & Ramezani-pour, A. A. (2016). The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slag-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111, 337–347. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.086>
 - James, J., Pandian, P. K., Deepika, K., Venkatesh, J. M., Manikandan, V., & Manikumar, P. (2016). Cement Stabilized Soil Blocks Admixed with Sugarcane Bagasse Ash. *Journal of Engineering*, 2016(Article in Press).
 - Jayasinghe, C., & Mallawaarachchi, R. S. (2009). Flexural strength of compressed stabilized earth masonry materials. *Materials and Design*, 30(9), 3859–3868. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.029>
 - Jiang, T., Li, G., Qiu, G., Fan, X., & Huang, Z. (2008). Thermal activation and alkali dissolution of silicon from illite. *Applied Clay Science*, 40(1–4), 81–89. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2007.08.002>
 - Jimenez Delgado, M. C., & Guerrero, I. C. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials*, 21(2), 237–251. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006>
 - Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232–1243. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.012>
 - Kamarudin, H., Bakri, A. M. M. Al, Binhussain, M., Ruzaidi, C. M., Luqman, M., & Heah, C. Y. (2011). Preliminary Study on Effect of NaOH Concentration on Early Age Compressive Strength of Kaolin-Based Green Cement. In *International Conference on Chemistry and Chemical Process* (Vol. 10, pp. 18–24).
 - Karthik, A., Sudalaimani, K., Vijayakumar, C. T., & Saravankumar, S. S. (2018). Effect of bio-additives on physico-chemical properties of fly ash-

- ground granulated blast furnace slag based self cured geopolymer mortars. *Journal of Hazardous Materials*, (August). <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.078>
- Kaya, K., & Soyer-uzun, S. (2016). Evolution of structural characteristics and compressive strength in red mud – metakaolin based geopolymer systems. *Ceramics International*, 42, 7406–7413.
 - Kenneth Mak, Colin MacDougall, Amir Fam, M. A. (2016). Freeze-Thaw Performance of On-Site Manufactured Compressed Earth Blocks: Effect of Water Repellent and Other Additives. *Journal of Materials in Civil Engineering*. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT)
 - Keshav, L., Srisanthi, V. G., & Balamurugan, G. (2014). Shaking Table Study of Two Reduced-Scale Single-Storey HCSE Block Masonry Building Models. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4), 2551–2560. <http://doi.org/10.1007/s13369-013-0893-6>
 - Khan, M. Z. N., Shaikh, F. uddin A., Hao, Y., & Hao, H. (2016). Synthesis of high strength ambient cured geopolymer composite by using low calcium fly ash. *Construction and Building Materials*, 125, 809–820. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.097>
 - Köhler, S. J., Bosbach, D., & Oelkers, E. H. (2005). Do clay mineral dissolution rates reach steady state? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(8), 1997–2006. <http://doi.org/10.1016/j.gca.2004.10.015>
 - Köhler, S. J., Dufaud, F., & Oelkers, E. H. (2003). An experimental study of illite dissolution kinetics as a function of pH from 1.4 to 12.4 and temperature from 5 to 50°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(19), 3583–3594. [http://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00163-7](http://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00163-7)
 - Komadel, P., & Madejová, J. (2006). Chapter 7.1 Acid Activation of Clay Minerals. *Developments in Clay Science*, 1, 263–287. [http://doi.org/10.1016/S1572-4352\(05\)01008-1](http://doi.org/10.1016/S1572-4352(05)01008-1)
 - Komnitsas, K. A. (2011). Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineering*, 21, 1023–1032. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2108>
 - Korniejenko, K., Frączek, E., Pytlak, E., & Adamski, M. (2016). Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers. *Procedia Engineering*, 151, 388–393. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.395>
 - Kouakou, C. H., & Morel, J. C. (2009). Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. *Applied Clay Science*, 44(1–2), 27–34. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2008.12.019>
 - Kwon, H. M., Le, A. T., & Nguyen, N. T. (2010). Influence of soil grading on properties of compressed cement-soil. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 14(6), 845–853. <http://doi.org/10.1007/s12205-010-0648-9>
 - Laborel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719–734. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>
 - Lahoti, M., Wong, K. K., Tan, K. H., & Yang, E. H. (2018). Effect of alkali cation type on strength endurance of fly ash geopolymers subject to high temperature exposure. *Materials and Design*, 154, 8–19. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.023>
 - Lassinanti Gualtieri, M., Cavallini, A., & Romagnoli, M. (2016). Interactive powder mixture concept for the preparation of geopolymers with fine porosity. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(10), 2641–2646. <http://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.03.030>
 - Laursen, P. T., Herskedal, N. a., Jansen, D. C., & Qu, B. (2013). Out-of-plane structural response of interlocking compressed earth block walls. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 1–16. <http://doi.org/10.1617/s11527-013-0186-2>
 - Lenci, S., Clementi, F., & Sadowski, T. (2012). Experimental determination of the fracture properties of unfired dry earth.pdf. *Engineering Fracture Mechanics*, 87, 62–72.
 - Li, C., Wang, L., Zhang, T., & Dong, J. (2016). Development of building material utilizing a low pozzolanic activity mineral. *Construction and Building Materials*, 121, 300–309. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.161>
 - Li, J., Tang, C., Wang, D., Pei, X., & Shi, B. (2014). Effect of discrete fibre reinforcement on soil tensile strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 133–137.
 - Li, Z., & Li, S. (2018). Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 668–680. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.127>
 - Liew, Y. M., Kamarudin, H., Bakri, a M. M. Al, Luqman, M., Nizar, I. K., & Heah, C. Y. (2011). Investigating The Possibility Of Utilization Of Kaolin And The Potential Of Metakaolin To Produce Green Cement For Construction Purposes – A Review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(9), 441–449.
 - Lima, S. A., Varum, H., Sales, A., & Neto, V. F. (2012). Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 35, 829–837. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.127>
 - Lopes, A. C., Martins, P., & Lanceros-Mendez, S. (2014). Aluminosilicate and aluminosilicate based polymer composites: Present status, applications and future trends. *Progress in Surface Science*, 89(3), 239–277. <http://doi.org/10.1016/j.progsurf.2014.08.002>
 - Lopes, N., Varum, H., Sposto, R. M., & Vila Real, P. (2012). Evaluation of performance under fire of compressed earth blocks. *ICEM15 15th International Conference on Experimental Mechanics*, 2, 797.
 - Louati, S., Baklouti, S., & Smeit, B. (2016). Acid based geopolymerization kinetics: Effect of clay particle size. *Applied Clay Science*, 132–133, 571–578. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.007>
 - Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Villegas, R., Arroyo, F., Vilches, L., & Fernández-Pereira, C. (2018). Carbon fiber waste incorporation in blast furnace slag geopolymer-composites. *Materials Letters*, 233, 1–3. <http://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.099>
 - MacKenzie, K. J. D., & Vagana, R. A. F. A. R. (2015). Formation of aluminosilicate geopolymers from 1 : 1 layer-lattice minerals pre-treated by various methods : A ... minerals pre-treated by various methods : a comparative study. *Journal of Materials Science*, (March). <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0173-x>
 - MacKenzie, K. J. D., Komphanchai, S., & Vagana, R. (2008). Formation of inorganic polymers (geopolymers) from 2:1 layer lattice aluminosilicates. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(1), 177–181. <http://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.06.004>
 - Madadipour, M. K., & Afzali, M. K. (2012). Effect of some natural additives on the mechanical properties of mud brick. *Structural Analysis of Historical Constructions*.
 - Maillard, P., & Aubert, J. E. (2014). Effects of the anisotropy of extruded earth bricks on their hygrothermal properties. *Construction and Building Materials*, 63, 56–61. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.001>
 - Maldonado Ramos, L., Castilla Pascual, F., & Vela Cossio, F. (2001). Rendimiento y coste energético en la construcción de cerramientos de fábrica de adobe y bloque de tierra comprimida. *Informes de La Construcción*, 53(473), 27–37. <http://doi.org/10.3989/ic.2001.v53.i473.669>
 - Mansour, M. Ben, Jelidi, A., Cherif, A. S., & Jabrallah, S. Ben. (2016). Optimizing thermal and mechanical performance of compressed earth blocks (CEB). *Construction and Building Materials*, 104, 44–51. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.024>
 - Marincic, I., Ochoa, J. M., Alpuche, M. G., & González, I. (2014). Comparative analysis of the thermal behavior between cellular concrete blocks and stabilized earth blocks as wall materials. *Energy Procedia*, 57, 1783–1791. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.167>
 - Maskell, D., Heath, A., & Walker, P. (2014). Inorganic stabilisation methods for extruded earth masonry units. *Construction and Building Materials*, 71, 602–609. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.094>
 - Maskell, D., Heath, A., & Walker, P. (2015). Use of metakaolin with stabilised extruded earth masonry units. *Construction and Building Materials*, 78, 172–180. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.041>
 - Matta, F., Cuéllar-Azcárate, M. C., & Garbin, E. (2015). Earthen masonry dwelling structures for extreme wind loads. *Engineering Structures*, 83, 163–175. <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.043>
 - McGregor, F., Heath, A., Fodde, E., & Shea, A. (2014). Conditions affecting the moisture buffering measurement performed on compressed earth blocks. *Building and Environment*, 75, 11–18. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.009>
 - McGregor, F., Heath, A., Shea, A., & Lawrence, M. (2014). The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment*, 82, 599–607. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027>

- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 1080–1090. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Medja Eko, R., Offa, E. D., Yatchoupou Ngatcha, T., & Seba Minsili, L. (2012). Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks. *Construction and Building Materials*, 35, 340–346. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.050>
- Melorose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). Experimentación con tierra sin cocer para generar tabiques expresivos en el diseño interior. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*, 1. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mercader, M. P., Ramírez de Arellano, A., & Olivares, M. (2012). Modelo de cuantificación de las emisiones de CO₂ producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. *Informes de La Construcción*, 64(527), 401–414. <http://doi.org/10.3989/ic.10.082>
- Meunier, A. (2005). *Clays*. Springer.
- Millogo, Y., Aubert, J.-E., Séré, A. D., Fabbri, A., & Morel, J.-C. (2016). Earth blocks stabilized by cow-dung. *Materials and Structures*. <http://doi.org/10.1617/s11527-016-0808-6>
- Millogo, Y., Morel, J. C., Aubert, J. E., & Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 52, 71–78. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.094>
- Minerals, N. R. C. (U. S.). C. on C., & Society, C. M. (1960). *Clays and clay minerals*. (D. of G. EARL INGERSON, Ed.). Oxford: Pergamon. Retrieved from <http://books.google.fr/books?id=OE0rAAAYAAJ>
- Miodrag Belosevic, M. G. E. D. Z. S. J. R. B. (2014). Degradation of Alizarin Yellow R using UV / H₂O₂ Advanced Oxidation Process. *Environmental Science & Technology*, 33(2), 482–489. <http://doi.org/10.1002/ep>
- Mohd Salahuddin, M. B., Norkhairunnisa, M., & Mustapha, F. (2015). A review on the thermophysical evaluation of alkali-activated geopolymers. *Ceramics International*, 41(3), 4273–4281. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.11.119>
- Mohsen, Q., & Mostafa, N. Y. (2010). Investigating the possibility of utilizing low kaolinitic clays in production of geopolymer bricks. *Ceramics - Silikaty*, 54(2), 160–168.
- Moore, D. M., & Reynolds, R. C. (1997). *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford : Oxford University Press. Retrieved from http://cbueg-mt.iii.com/iii/encore/record/C__Rb3919395__Sx-ray+diffraction+clay+minerals__Orightresult__U__X2?lang=cat&suite=def
- Morel, J. C., & Pkla, A. (2002). A model to measure compressive strength of compressed earth blocks with the “3 points bending test.” *Construction and Building Materials*, 16(5), 303–310. [http://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00023-5](http://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00023-5)
- Morel, J. C., Aubert, J. E., Millogo, Y., Hamard, E., & Fabbri, A. (2013). Some observations about the paper “earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction” by F. Pacheco-Torgal and S. Jalali. *Construction and Building Materials*, 44, 419–421. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.054>
- Morel, J. C., Pkla, A., & Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 21(2), 303–309. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>
- Muhammad Faheem, M. T., Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Binhusain, M., Ruzaidi, C. M., & Izzat, A. M. (2012). Application of Clay - Based Geopolymer in Brick Production: A Review. *Advanced Materials Research*, 626, 878–882. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.878>
- Munlohar, A. S. (2011). Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4215–4220. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.061>
- Nagaraj, H. B., Rajesh, A., & Sravan, M. V. (2016). Influence of soil gradation , proportion and combination of admixtures on the properties and durability of CSEBs. *Construction and Building Materials*, 110, 135–144.
- Naik, T. R., & Kumar, R. (2013). *Geopolymer Concrete for Sustainable Developments : Opportunities , Limitations , and Future Needs*. International Conference on Sustainable Construction Material and Technologies.
- Najafi Kani, E., Allahverdi, A., & Provis, J. L. (2017). Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(3), 2181–2190. <http://doi.org/10.1007/s10973-016-5850-7>
- Nazari, A., Sanjayan, J. G., & Van Deventer, J. S. J. (2017). Chapter 10 – Progress in the Adoption of Geopolymer Cement. In *Handbook of Low Carbon Concrete* (pp. 217–262). <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-804524-4.00010-5>
- Nazari, A., Sanjayan, J. G., Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Miraldo, S., & Kheradmand, M. (2017). Chapter 9 – Alkali-Activated Cement-Based Binders (AACBs) as Durable and Cost-Competitive Low-CO₂ Binder Materials: Some Shortcomings That Need to be Addressed. In *Handbook of Low Carbon Concrete* (pp. 195–216). <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-804524-4.00009-9>
- Nazari, A., Sanjayan, J. G., Part, W. K., Ramli, M., & Cheah, C. B. (2017). Chapter 11 – An Overview on the Influence of Various Factors on the Properties of Geopolymer Concrete Derived From Industrial Byproducts. In *Handbook of Low Carbon Concrete* (pp. 263–334). <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-804524-4.00011-7>
- Ng, T., Voo, Y., & Foster, S. (2012). Sustainability with Ultra-High Performance and Geopolymer Concrete Construction. *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*, 13(1992), 81–100. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-1997-2_5
- Niroumand, H., Zain, M. F. M., & Jamil, M. (2013). A guideline for assessing of critical parameters on Earth architecture and Earth buildings as a sustainable architecture in various countries. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 89, 248–260. <http://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.843>
- Noor-Ul-Amin. (2012). Use of clay as a cement replacement in mortar and its chemical activation to reduce the cost and emission of greenhouse gases. *Construction and Building Materials*, 34, 381–384. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.022>
- Obonyo, E. A., Kamseu, E., Lemougna, P. N., Tchamba, A. B., Melo, U. C., & Leonelli, C. (2014). A sustainable approach for the geopolymerization of natural iron-rich aluminosilicate materials. *Sustainability (Switzerland)*, 6(9), 5535–5553. <http://doi.org/10.3390/su6095535>
- Ogundiran, M. B., & Kumar, S. (2015). Synthesis and characterisation of geopolymer from Nigerian Clay. *Applied Clay Science*, 108, 173–181. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.022>
- Ogunye, F. O., & Boussabaine, H. (2002). Development of a rainfall test rig as an aid in soil block weathering assessment. *Construction and Building Materials*, 16(3), 173–180. [http://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00010-7](http://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00010-7)
- Ogunye, F. O., & Boussabaine, H. (2002). Diagnosis of assessment methods for weatherability of stabilised compressed soil blocks. *Construction and Building Materials*, 16(3), 163–172. [http://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00004-1](http://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00004-1)
- Okamoto, M., & Sinha Ray, S. (2004). *Polymer/Clay Nanocomposites*. In H. S. Nalwa (Ed.), *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology* (pp. 791–843). Tempaku, Nagoya, Japan: Toyota Technological Institute. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Masami_Okamoto/publication/286178858_PolymerClay_Nanocomposites/links/5833c7b808ae102f07368d40/Polymer-Clay-Nanocomposites.pdf
- Omar, S., Messan, A., Prud, E., Escadeillas, G., & Tsohnang, F. (2018). Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso. *Construction and Building Materials*, 165, 333–345. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051>
- Ordoñez, J., & Fajardo, R. (2015). Estudio Inicial De Geo-Polimeros a Partir De Arcillas. *REVISTA FUENTES: El Reventón Energético*, 13(2), 113/117-113/117. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.18273/revfue.v13n22015010>
- Ouellet-plamondon, C. M., & Habert, G. (2016). Self-Compacted Clay based Concrete (SCCC) : proof-of-concept. *Journal of Cleaner Production*, 1–9.
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A. F., Jamshidi, M., & Ding, Y. (2012). Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue? *Construction and Building Materials*, 30, 400–405. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.017>
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., Blanco, M. T. (1999). Alkali activated fly ashes: A cement for future. *Cement and Concrete Research*, 29(May 2014), 1323–1329.
- Panagiotopoulou, C., Kontori, E., Perraki, T., & Kakali, G. (2007). Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media. *Journal of*

- Materials Science, 42(9), 2967–2973. <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0531-8>
- Panias, D., & Giannopoulou, I. (2004). Geopolymers: a new generation of inorganic polymeric novel materials. *Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology*, (June 2014), 407–412. Retrieved from <https://books.google.be/books?hl=nl&lr=&id=zYSIZ6WlrigC&oi=fnd&pg=PA407&dq=related:Avl8FVx0Cwq5M:scholar.google.com/&ots=vZXPZSOzQ0&sig=VmDj1Uz7U1ccYe3Ea-zj4RAce8k#v=onepage&q&f=true>
 - Parisi, F., Asprone, D., Fenu, L., & Prota, A. (2015). Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers. *Composite Structures*, 122, 300–307. <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.060>
 - Passuello, A., Rodríguez, E. D., Hirt, E., Longhi, M., Bernal, S. A., Provis, J. L., & Kirchheim, A. P. (2017). Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators. *Journal of Cleaner Production*, 166, 680–689. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.007>
 - Patrick N Lemougna, Wang Kai-tuo, Tang Qing, U Chinje Melo, C. X. (2016). Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications Patrick. *Ceramics International*, 42(14), 15142–15159. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.027>
 - Peng, Z., Vance, K., Dakhane, A., Marzke, R., & Neithalath, N. (2014). Microstructural and ²⁹Si MAS NMR spectroscopic evaluations of alkali cationic effects on fly ash activation. *Cement and Concrete Composites*, 57, 34–43. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.005>
 - Perera, D. S., Hanna, J. V., Davis, J., Blackford, M. G., Latella, B. A., Sasaki, Y., & Vance, E. R. (2008). Relative strengths of phosphoric acid-reacted and alkali-reacted metakaolin materials. *Journal of Materials Science*, 43(19), 6562–6566. <http://doi.org/10.1007/s10853-008-2913-6>
 - Perná, I., & Monika, S. (2014). The identification of geopolymer affinity in specific cases of clay materials. *Applied Clay Science*, 102, 213–219. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2014.09.042>
 - Petrillo, A., Ciuffi, R., Ferone, C., Colangelo, F., & Borrelli, C. (2016). Eco-sustainable Geopolymer Concrete Blocks Production Process. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 8, 408–418. <http://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.037>
 - Peyne, J., Gautron, J., Doudeau, J., Joussein, E., & Rossignol, S. (2017). Influence of silicate solution preparation on geomaterials based on brick clay materials. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 471(May), 110–119. <http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.05.017>
 - Peyne, J., Joussein, E., Gautron, J., Doudeau, J., & Rossignol, S. (2017). Feasibility of producing geopolymer binder based on a brick clay mixture. *Ceramics International*, 43(13), 9860–9871. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.169>
 - Piattoni, Q., Quagliarini, E., & Lenci, S. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2067–2075. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.039>
 - Provis, J. L. (2016). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research Journal*. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.023>
 - Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annu. Rev. Mater. Res*, 44(June), 299–327. <http://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>
 - Ramachandran, V. S., Paroli, R. M., Beaudoin, J. J., & Delgad, A. H. (2002). Clay-Based Construction Products. *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*, 491–530.
 - Ramasamy, S., Hussin, K., Mustafa, M., Bakri, A., Mohd, C., Ghazali, R., ... Binhussain, M. (2015). Recent Dissertations on Kaolin Based Geopolymer Materials. *Rev. Adv. Mater.*
 - Reddy, B. V. V., & Jagadish, K. S. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *ScienceDirect - Energy and Buildings* ; 35, 129–137
 - Robayo, R. A., Mulford, A., Munera, J., & Gutiérrez, R. M. De. (2016). 2016-Alternative_cements_based_on_alkali-activated_red_clay_brick_waste. *Construction and Building Materials*, 128, 163–169.
 - Rowles, M., & O'Connor, B. (2003). Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. *Journal of Materials Chemistry*, 13(November), 1161–1165. <http://doi.org/10.1039/b212629j>
 - Rozalen, M., Huertas, F. J., & Brady, P. V. (2009). Experimental study of the effect of pH and temperature on the kinetics of montmorillonite dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 3752–3766. <http://doi.org/10.1016/j.gca.2009.03.026>
 - Sá Ribeiro, R. A., Sá Ribeiro, M. G., Sankar, K., & Kriven, W. M. (2016). Geopolymer-bamboo composite ??? A novel sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 123, 501–507. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.037>
 - Sadat, M. R., Binguier, S., Muralidharan, K., Runge, K., Asaduzzaman, A., & Zhang, L. (2016). An atomistic characterization of the interplay between composition, structure and mechanical properties of amorphous geopolymer binders. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 434, 53–61. <http://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2015.11.022>
 - Salim, R. W., Ndambuki, J. M., & Adedokun, D. A. (2014). Improving the bearing strength of sandy loam soil compressed earth block bricks using Sugarcane Bagasse Ash. *Sustainability (Switzerland)*, 6(6), 3686–3696. <http://doi.org/10.3390/su6063686>
 - Sanjayan, J. G. (2015). The Properties of Fly Ash Based Geopolymer Mortars Made with Dune Sand. *Materials and Design*, 92, 571–578. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.070>
 - Selmani, S., Sdiri, A., Bouaziz, S., Joussein, E., & Rossignol, S. (2017). Effects of metakaolin addition on geopolymer prepared from natural kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 146(June), 457–467. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.019>
 - Shaabani, Yasaman; Sirosaz, Mohammad; Kheiri, F. (2016). Crosslinked swellable clay/egg white bionanocomposites. *Applied Clay Science*, 126, 287–296. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2016.03.027>
 - Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750–763. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>
 - Shon, C. S., Saylak, D., & Zollinger, D. G. (2009). Potential use of stockpiled circulating fluidized bed combustion ashes in manufacturing compressed earth bricks. *Construction and Building Materials*, 23(5), 2062–2071. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.025>
 - Silva, R. A., Soares, E., Oliveira, D. V., Miranda, T., Cristelo, N., & Oliveira, J. V. (2015). CEBs stabilised with geopolymeric binders: mechanical performance of dry-stack masonry. *Construction and Building Materials*, 75, 336–342.
 - Singhal, A., & Singh, Y. (2015). *Advances in Structural Engineering. Advances in Structural Engineering: Dynamics, Volume Two*. Springer. <http://doi.org/10.1007/978-81-322-2193-7>
 - Singhal, A., & Singh, Y. (2015). Feasibility of Using Compressed Earth Block as Partition Wall. *Advances in Structural Engineering: Dynamics, Volume Two*, 921–932. <http://doi.org/10.1007/978-81-322-2193-7>
 - Slaty, F., Khoury, H., Rahier, H., & Wastiels, J. (2015). Durability of alkali activated cement produced from kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 104, 229–237. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.037>
 - Soares, P., Pinto, A. T., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A. (2008). Geopolimeros basados en residuos de la producción de áridos ligeros Geopolymerization of lightweight aggregate waste. *Materiales de Construcción*, 58, 23–34.
 - Srisanthi, V. G., Keshav, L., Poorna Kumar, P., & Jayakumar, T. (2014). Finite element and experimental analysis of 3D masonry compressed stabilised earth block and brick building models against earthquake forces. *Periodica Polytechnica: Civil Engineering*, 58(3), 255–265. <http://doi.org/10.3311/PPci.7443>
 - Strum, T. M., Ramos, J. L. F. D. S., & Lourenço, P. J. B. (2013). Characterization of dry-stack interlocking compressed earth blocks. *Materials and Structures*, 1–39. <http://doi.org/10.1617/s11527-014-0379-3>
 - Subramaniaprasad, C. K., Abraham, B. M., & Nambiar, E. K. K. (2014). Influence of Embedded Waste-Plastic Fibers on the Improvement of the Tensile Strength of Stabilized Mud Masonry Blocks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), 1–7. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001165](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001165)
 - Subramaniaprasad, C. K., Abraham, B. M., & Nambiar, E. K. K. (2014). Sorption characteristics of stabilised soil blocks embedded with waste plastic fibres. *Construction and Building Materials*, 63, 25–32. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.042>
 - Sudo T. Yotsumoto H., Aita S., S. S. (1981). Electron micrographs of clay minerals. *Dev. in Sedimentology*, 31, 203 P., 203.
 - Taallah, B., & Gueftala, A. (2016). The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and

- alkali-treated date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 104, 52–62. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>
- Taallah, B., Gueftala, A., Gueftala, S., & Kriker, A. (2014). Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers. *Construction and Building Materials*, 59, 161–168. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058>
 - Tang, C.-S., Shi, B., & Zhao, L.-Z. (2010). Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 54–62. <http://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.001>
 - Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra*.
 - Tate, D., Ertas, A., Maxwell, T., Park, K., Lawson, W., Laudon, M., ... Laird, D. L. (2008). Design and Development of a Large-Scale Compressed Earth Block Building System for Developed Countries. *Clean Technology 2008: Bio Energy, Renewables, Green Building, Smart Grid, Storage, and Water*, 174–177.
 - Tennakoon, C., Nicolas, R. S., Sanjayan, J. G., & Shayan, A. (2016). Thermal effects of activators on the setting time and rate of workability loss of geopolymers. *Ceramics International*, 42(September), 19257–19268.
 - Tennant, A. G., Foster, C. D., & Reddy, B. V. V. (2016). Detailed Experimental Review of Flexural Behavior of Cement Stabilized Soil Block Masonry. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1–5. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001548](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001548).
 - Thomark, C. (2006). The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. *Building and Environment*, 41(8), 1019–1026. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.026>
 - Torgal, F. P. (2015). Eco-efficient masonry bricks and blocks design, properties and durability. Woodhead Pub.
 - Tuyan, M., Andic-Cakir, O., & Ramyar, K. (2018). Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer. *Composites Part B: Engineering*, 135(November 2016), 242–252. <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.013>
 - Urquiza, E. A. F., Luisa, M., & Roldúa, M. (2009). Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos. *Ingenierías*, XII(44), 35–41.
 - Venkatarama Reddy, B. V. (2009). Sustainable materials for low carbon buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 4(3), 175–181. <http://doi.org/10.1093/ijlct/ctp025>
 - Villamizar, M. C. N., Araque, V. S., Reyes, C. A. R., & Silva, R. S. (2012). Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 36, 276–286. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.056>
 - Vinai, R., Lawane, A., Minane, J. R., & Amadou, A. (2013). Coal combustion residues valorisation: Research and development on compressed brick production. *Construction and Building Materials*, 40, 1088–1096. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.096>
 - Vincenzini, P., & Leonelli, C. (2010). Geopolymers and Geocements: Low Environmental Impact Ceramic Materials. In *Proceedings of the 12 th International Ceramics Congress, part of CIMTEC 2010- 12 th International Ceramics Congress and 5th Forum on New Materials Montecatini Terme* (p. 210). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
 - Volhard, F., & Aymone, N. (2016). Construire en terre allégée. [Arles] : Actes Sud. Retrieved from http://catalogue.upc.edu/record=b1481111~S1*cat
 - Walker, P. (2004). Strength and Erosion Characteristics of Earth Blocks and Earth Block Masonry. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(5), 497–506. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:5\(497\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:5(497))
 - Walker, P. J. (1995). Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cement and Concrete Composites*, 17(4), 301–310. [http://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00019-9](http://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00019-9)
 - Weaver, C. E., & Pollard, L. D. (1973). The chemistry of clay minerals. *Dev. Sedimentology*, 15, 213 pp. [http://doi.org/10.1016/S0070-4571\(09\)70015-9](http://doi.org/10.1016/S0070-4571(09)70015-9)
 - Widder, L. (2017). Earth eco-building: textile-reinforced earth block construction. *Energy Procedia*, 122, 757–762.
 - Willett, J. C. (2018). 2015 Minerals Yearbook. 2015 Minerals Yearbook, (September), 14. <http://doi.org/10.1016/j.jiporl.2012.07.018>
 - Xu, H. (2001). Effect of Alkali Metals on the Preferential Geopolymerization of Sti lbite/Kaolinite Mixtures. *American Chemical Society*, 3749–3756.
 - Xu, H. (2002). Geopolymerisation of aluminosilicate minerals. The University of Melbourne.
 - Xu, H., & Deventer, J. S. J. Van. (2002). Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals Engineering*, 15, 1131–1139.
 - Xu, H., & Jannie, S. J. (2003). The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars. *Colloids and Surfaces*, 216, 27–44.
 - Ye, N., Yang, J., Liang, S., Hu, Y., Hu, J., Xiao, B., & Huang, Q. (2016). Synthesis and strength optimization of one-part geopolymer based on red mud. *Construction and Building Materials*, 111, 317–325.
 - You, S., Ho, S. W., Li, T., Maneeerung, T., & Wang, C.-H. (2018). Techno-economic analysis of geopolymer production from the coal fly ash with high iron oxide and calcium oxide contents. *Journal of Hazardous Materials*, (August). <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.089>
 - Yousef, R. I., El-Eswed, B., Alshaer, M., Khalili, F., & Khoury, H. (2009). The influence of using Jordanian natural zeolite on the adsorption, physical, and mechanical properties of geopolymers products. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1–3), 379–387. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.004>
 - Yousef, R. I., El-Eswed, B., Alshaer, M., Khalili, F., & Rahier, H. (2012). Degree of reactivity of two kaolinitic minerals in alkali solution using zeolitic tuff or silica sand filler. *Ceramics International*, 38(6), 5061–5067. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.03.008>
 - Yu, H., Zheng, L., Yang, J., & Yang, L. (2015). Stabilised compressed earth bricks made with coastal solonchak. *Construction and Building Materials*, 77, 409–418. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.069>
 - Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133–1140. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
 - Zhang, N., Li, H., Peng, D., & Liu, X. (2016). Properties evaluation of silica-alumina based concrete: Durability and environmental friendly performance. *Construction and Building Materials*, 115, 105–113. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.043>
 - Zhang, Z. H., Zhu, H. J., Zhou, C. H., & Wang, H. (2016). Geopolymer from kaolin in China: An overview. *Applied Clay Science*, 119, 31–41. <http://doi.org/10.1016/j.clay.2015.04.023>