

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**



**Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos  
Departamento de Ingeniería de la  
Construcción y de Proyectos de Ingeniería  
Civil**

**TESIS DOCTORAL**

**UTILIZACIÓN DE GEOPOLÍMERO  
PARA LA MEJORA DE LAS  
PROPIEDADES EN MORTEROS CAL-  
PUZOLANA Y SU EMPLEO EN PAÍSES  
EN DESARROLLO**

**Ariel Rey Villca Pozo**

Dirigida por:

Prof. Dra. Lourdes Soriano Martínez

Prof. Dr. José María Monzó Balbuena



**València, junio de 2021**

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y**  
**Puertos**  
Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de  
Ingeniería Civil

Utilización de geopolímero para la mejora de las  
propiedades en morteros cal-puzolana y su empleo en  
países en desarrollo

Tesis doctoral presentado por:  
Ariel Rey Villca Pozo

Dirigido por:

Prof. Dra. Lourdes Soriano Martínez  
Prof. Dr. José María Monzó Balbuena

Valencia, junio de 2021

*A mi madre Martha Pozo L. y a la memoria  
de mi padre el Lic. Valentín Villca M.,  
quienes me enseñaron el camino para llegar  
donde he llegado.*

## *Agradecimientos*

Me siento especialmente agradecido a mis estimados tutores Lourdes y José María quienes tuvieron que leer todo el material durante su preparación y hacer numerosas correcciones y contribuciones, además de contar con su gran ayuda, comprensión, desde el principio en esta nueva área del conocimiento desconocido hasta el momento por mi persona.

A lo largo de estos años he recibido ayuda, amistad y formación de grandes investigadores con gran talento, los profesores M. Victoria Borrachero, Ana Mellado y Jordi Payá, del grupo GIQUIMA (Grupo de investigadores en química de materiales de construcción), ha sido una bendición contar con ellos.

Al ICITECH (Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón) que me ha brindado un entorno único para realizar esta investigación y gracias al programa ADSIDEO-COOPERACIÓN de la Universitat Politècnica de València, que me ha brindado financiación para la presente investigación.

A la Sra. Consuelo Martínez por las innumerables paellas invitadas, a mis amigos Alba, Manolo, Francisco, Enrique, por hacerme sentir como en casa y brindarme su ayuda cuando ha sido necesario.

A todas las personas de diferentes nacionalidades (Ecuador, Perú, Guatemala, Salvador, Chile, Costa Rica, Honduras, España) que pasaron por el laboratorio y enriquecerme culturalmente.

Y finalmente a mis hermanos por su apoyo, colaboración, a lo largo de este tiempo. A Sorka que sin su ayuda incondicional no hubiese posible este sueño, Gracias.

### RESUMEN

El descubrimiento del cemento Portland ha cambiado nuestra forma de construir, pero también es el responsable de grandes emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante su fabricación (~1450 °C), agravando la crisis actual que está sufriendo nuestro planeta debido al cambio climático y sus consecuencias en todo el medio ambiente.

Por lo tanto, una alternativa más sostenible en la construcción es la utilización de la cal que necesita menor temperatura para su fabricación (~900 °C). Si bien la introducción de puzolanas naturales o artificiales en morteros de cal han mejorado sus propiedades mecánicas y de durabilidad, estas aún tienen el inconveniente de ganar resistencias a edades largas de curado. Es por esta razón que en la presente tesis se pretende eliminar este inconveniente técnico, buscando la asociación de la cal con nuevos conglomerantes más sostenibles a partir de residuos para obtener morteros mixtos denominados cal/puzolana-geopolímero.

Los residuos estudiados fueron: el catalizador gastado de craqueo catalítico, la ceniza de cascara de arroz, la tierra diatomea de origen residual y la ceniza de lodo de depuradora. También se estudia una puzolana natural proveniente de la República de Guatemala.

En los morteros cal/puzolana (cal/FCC, cal/CCA, cal/CLD) se ha realizado sustituciones en peso hasta un 50 % de la mezcla cal/puzolana por geopolímero. El geopolímero se obtiene por una combinación del FCC como precursor y diferentes activadores alcalinos siendo estos la

## RESUMEN

---

mezcla de: NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, NaOH/CCA, NaOH/TDN y NaOH/TDR. Los últimos tres sustituyen al silicato comercial como fuente de sílice alternativa.

Asimismo, se realizaron estudios a nivel mecánico y microestructural. Para los estudios microestructurales, tanto de muestras endurecidas como de materiales de partida, se emplearon como técnicas: FRX, ADL, TG, DRX y FESEM.

Los resultados han demostrado con éxito que añadir pequeñas cantidades de geopolímero sobre el sistema cal/puzolana fue notable, debido a que este potenció la formación de los nuevos productos de reacción, lo que mejoró la resistencia mecánica de los morteros desde las primeras horas de curado, llegando a obtener 7 veces más de resistencia que un mortero control cal/puzolana en 1 día de curado.

El reemplazo del silicato de sodio comercial por CCA, TDN, TDR, como fuente de sílice, condujo a mejores desempeños del mortero en términos de resistencia a la compresión. Además, redujo el coeficiente de absorción de agua por capilaridad y aumento el tiempo de exposición a los ciclos hielo-deshielo frente a los morteros activados con activadores comerciales.

Finalmente, los conglomerantes desarrollados en este estudio podría beneficiar tanto a la gestión de residuos como al desarrollo de materiales de construcción más sostenibles, aportando a los objetivos propuestos en la agenda 2030.

### ABSTRACT

The discovery of Portland cement has changed the way we build; however, it is also responsible for large CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere during its manufacturing (~ 1450 °C), thereby aggravating the current crisis that our planet is suffering due to climate change and its consequences in the environment.

Thus, a more sustainable alternative in construction is the use of lime that requires a lower temperature for its manufacturing (~ 900 °C). The introduction of natural or artificial pozzolans in lime mortars has improved their mechanical properties and durability. Nevertheless, they present some technical disadvantages, as the low compressive strength, especially at early curing time.

This thesis aims to eliminate this technical disadvantage by mixing lime with new more sustainable binders derived from waste, obtaining mixed mortars called lime/pozzolan-geopolymer

The waste materials studied included fluid catalytic cracking residue (FCC), rice husk ash (CCA), residual diatomite (TDR) and sewage sludge ash (CLD). A natural pozzolan from the Republic of Guatemala was also studied.

In the experimental procedure, in lime/pozzolan mortar mixtures (lime/FCC, lime/CCA, lime/CLD), up to 50% of their weight was substituted by geopolymer. The geopolymer is obtained by combining FCC as a precursor, and different alkaline activator mixtures including NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (commercial waterglass), NaOH/CCA, NaOH/TDN, and NaOH/TDR, with the last three being an alternative silica source to commercial waterglass.

## RESUMEN

---

In the same way, both mechanical and microstructural studies were carried out. The following techniques were used: XRF, ADL, TG, XRD and FESEM to assess the microstructural properties of both the raw materials and the hardened samples.

The results have demonstrated that adding small amounts of geopolymer to the lime/pozzolan system was remarkable; it enhanced the formation of new reaction products, which improved the mechanical strength of the mortar from the first hours of curing, obtaining 7 times more strength than the lime/pozzolan control mortar in 1 day of curing.

The replacement of commercial waterglass by CCA, TDN, TDR, as a source of silica, led to better performance of the mortar in terms of compressive strength. In addition, the coefficient of water absorption by capillarity was reduced and the exposure time during freezing–thawing cycles was increased compared to mortars activated with commercial activators.

Finally, the binders developed in this study could benefit both waste management and the development of more sustainable construction materials, contributing to the objectives proposed in the 2030 Agenda.

### RESUM DE LA TESI

El descobriment del ciment Portland ha canviat la nostra manera de construir, però també és el responsable de grans emissions de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera durant la seva fabricació (~1450 °C), agreujant la crisi actual que està patint el nostre planeta degut al canvi climàtic i les seves conseqüències en tot el medi ambient.

Per tant, una alternativa més sostenible en la construcció és la utilització de la calç que necessita menor temperatura per a la seva fabricació (~900 °C). Si bé la introducció de putzolanes naturals o artificials en morters de calç han millorat les seves propietats mecàniques i de durabilitat, aquestes encara tenen l'inconvenient de guanyar resistències a edats llargues de curat. És per aquesta raó que en la present tesi es pretén eliminar aquest inconvenient tècnic, buscant l'associació de la calç amb nous conglomerants més sostenibles a partir de residus per a obtenir morters mixtos denominats calç/putzolana-geopolímer.

Els residus estudiats van ser: el catalitzador gastat del craqueig catalític, la cendra de closca d'arròs, la terra diatomea d'origen residual i la cendra de llot de depuradora. També es va estudiar una putzolana natural provinent de la República de Guatemala.

En els morters calç/putzolana (calç/FCC, calç/CCA, calç/CLD) s'ha realitzat substitucions en pes fins a un 50 % de la barreja calç/putzolana per geopolímer. El geopolímer s'obté per una combinació del FCC com a precursor i diferents activadors alcalins, sent aquests la mescla de:

## RESUMEN

---

NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, NaOH/CCA, NaOH/TDN i NaOH/TDR. Els últims tres substitueixen al silicat comercial com a font de sílice alternativa.

Així mateix, es van realitzar estudis a nivell mecànic i microestructural. Per als estudis microestructurals, tant de mostres endurides com de materia primera, es van emprar tècniques com: FRX, ADL, TG, DRX i FESEM.

Els resultats han demostrat amb èxit que afegir petites quantitats de geopolímer sobre el sistema calç/putzolana va ser notable, pel fet que aquest va potenciar la formació dels nous productes de reacció, la qual cosa va millorar la resistència mecànica dels morters des de les primeres hores de curat, arribant a obtenir 7 vegades més de resistència que un morter control calç/putzolana en 1 dia de curat.

El reemplaçament del silicat de sodi comercial per CCA, TDN, TDR, com a font de sílice, va conduir a millors acompliments del morter en termes de resistència a la compressió. A més, va reduir el coeficient d'absorció d'aigua per capil·laritat i va augmentar el temps d'exposició als cicles gel-desgel enfront dels morters activats amb activadors comercials.

Finalment, els conglomerants desenvolupats en aquest estudi podrien beneficiar tant a la gestió de residus com al desenvolupament de materials de construcció més sostenibles, aportant als objectius proposats en l'Agenda 2030.

ÍNDICE

**RESUMEN** ..... **V**

**ÍNDICE** ..... **XI**

CONVENCIONES ..... XVI

**1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA** ..... **18**

1.1 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) ..... 18

1.2 Déficit de la vivienda en países en desarrollo de América Latina.. 21

1.2.1 Situación de la vivienda social en Bolivia..... 26

1.2.2 Importancia de la vivienda de bajo costo ..... 28

1.3 Eficiencia energética en los edificios ..... 29

1.4 Cemento portland y su impacto ambiental ..... 33

1.5 Antecedentes históricos de la cal ..... 37

1.5.1 La cal ..... 39

1.5.2 Tipos de cal ..... 42

1.5.3 Propiedades de la cal ..... 45

1.5.4 Usos y aplicaciones de la cal ..... 45

1.6 Antecedentes históricos de la activación alcalina ..... 46

1.6.1 Activación alcalina ..... 48

1.6.2 Clasificación de los métodos de activación alcalina ..... 48

1.6.3 Proceso de activación alcalina ..... 49

1.6.4 Activadores Alcalinos..... 51

1.6.5 Activadores Alternativos ..... 53

1.7 Puzzolanas utilizadas en la investigación ..... 54

1.7.1 Catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) ..... 55

# ÍNDICE

---

1.7.2	Ceniza de cascarilla de arroz (CCA).....	61
1.7.3	Ceniza de lodo de depuradora (CLD).....	74
1.7.4	Tierra de diatomea (TD).....	82
1.8	Justificación del problema .....	91
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>95</b>
2.1	Objetivo general .....	96
2.2	Objetivos específicos .....	97
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>99</b>
3.1	Materiales.....	99
3.1.1	La cal.....	99
3.1.2	Catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) .....	99
3.1.3	Ceniza de cáscara de arroz (CCA).....	100
3.1.4	Ceniza de lodo de depuradora (CLD).....	100
3.1.5	Tierra de diatomea natural de Guatemala (TDN).....	101
3.1.6	Tierra de diatomea residual (TDR).....	101
3.1.7	Hidróxido de sodio.....	101
3.1.8	Silicato de sodio.....	102
3.1.9	Árido .....	102
3.1.10	Otros reactivos químicos .....	102
3.2	Procedimientos experimentales.....	103
3.2.1	Preparación de las disoluciones a partir de silicato sódico comercial (GCOM) 103	
3.2.2	Preparación de la disolución activadora con el uso de fuentes de sílice alternativas .....	105
3.2.3	Preparación de las pastas.....	106
3.2.4	Preparación de los morteros .....	107
3.2.5	Medida de la consistencia por el método de la mesa de sacudidas..	110
3.2.6	Medidas de resistencias mecánicas.....	111

3.2.6.1	Resistencia a la compresión .....	112
3.2.6.2	Resistencia a la flexión .....	112
3.2.7	Pruebas de absorción de agua por capilaridad.....	114
3.2.8	Ciclos de hielo y deshielo.....	115
3.3	Equipamiento.....	116
3.3.1	Fluorescencia de rayos X (FRX) .....	117
3.3.2	Granulometría por difracción láser (ADL).....	118
3.3.3	Análisis termogravimétrico (TG).....	119
3.3.4	Difracción de rayos X (DRX) .....	121
3.3.5	Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) .	123
3.3.6	Cámara climática .....	125
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>128</b>
4.1	Caracterización de las materias primas .....	128
4.1.1	Catalizador de craqueo catalítico (FCC).....	128
4.1.2	Ceniza de Casca de Arroz (CCA).....	131
4.1.3	Ceniza de lodo de depuradora (CLD).....	134
4.1.4	Tierra de diatomea natural de Guatemala (TDN).....	137
4.1.5	Tierra de diatomea residual de cerveza Heineken (TDR) .....	140
4.2	Propiedades químicas de las pastas mixtas.....	143
4.2.1	Análisis Termogravimétrico .....	144
4.2.1.1	Análisis termogravimétrico de las pastas cal/FCC.....	144
4.2.1.2	Análisis Termogravimétrico de las pastas cal/CCA.....	157
4.2.1.3	Análisis Termogravimétrico de las pastas cal/CLD.....	166
4.2.2	Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM).	173
4.2.2.1	FESEM para pastas con FCC como puzolana .....	173
4.2.2.2	FESEM para pastas con CCA como puzolana .....	177
4.2.2.3	FESEM para pastas con CLD como puzolana.....	180
4.3	Propiedades físicas de los morteros mixtos .....	183

# ÍNDICE

---

4.3.1	Consistencia de los morteros por el método de la mesa de sacudidas...	183
4.3.2	Resistencia a la compresión de los morteros cal/FCC con sustituciones por geopolímero .....	187
4.3.2.1	Mezclas cal/FFC con sustituciones por geopolímero comercial (FCC GCOM) .....	188
4.3.2.2	Mezclas cal/FFC con sustituciones por geopolímero a partir de CCA (FCC GRES) .....	191
4.3.2.3	Mezclas cal/FFC con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea natural (FCC GTDN) .....	194
4.3.2.4	Mezclas cal/FFC con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea residual (FCC GTDR) .....	196
4.3.2.5	Discusión de los morteros cal/FCC con los distintos tipos de geopolímero .....	198
4.3.3	Resistencia a la compresión de los morteros cal/CCA con sustituciones por geopolímero .....	199
4.3.3.1	Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero comercial (CCA GCOM) .....	200
4.3.3.2	Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero a partir de CCA (CCA GRES) .....	202
4.3.3.3	Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea natural (CCA GTDN) .....	205
4.3.3.4	Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea residual (CCA GTDR) .....	207
4.3.3.5	Discusión de los morteros cal/CCA con los distintos tipos de geopolímero .....	208
4.3.4	Resistencia a la compresión de los morteros cal/CLD con sustituciones por geopolímero .....	210
4.3.4.1	Mezclas cal/CLD con sustituciones por geopolímero comercial (CLD GCOM) .....	211

4.3.4.2	Mezclas cal/ CLD con sustituciones por geopolímero a partir de CCA (CLD GRES) .....	212
4.3.4.3	Discusión de los morteros cal/CLD con sustituciones por geopolímeros. ....	214
4.3.5	Discusión del comportamiento de las diferentes puzolanas con relación a la resistencia en la compresión. ....	215
4.4	Ensayos de durabilidad .....	221
4.4.1	Pruebas de absorción de agua por capilaridad.....	221
4.4.1.1	Mezclas cal/FCC con sustituciones por geopolímero comercial y alternativos .....	222
4.4.1.2	Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero comercial y alternativos .....	223
4.4.1.3	Mezclas cal/CLD con sustituciones por geopolímero comercial y alternativos .....	224
4.4.1.4	Discusión del comportamiento de las diferentes puzolanas con relación a la absorción de agua por capilaridad.....	225
4.4.2	Ciclos de hielo y deshielo.....	229
4.5	Propuesta de la vivienda de bajo coste .....	240
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>248</b>
5.1	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	251
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>254</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>275</b>
ANEXO I	Índice de figuras .....	275
ANEXO II	Índice de tablas .....	282
ANEXO III	Proyecto de Vivienda de bajo coste.....	285

### CONVENCIONES

ADL	Granulometría por difracción láser
CAA	Coefficiente de absorción de agua
CCA	Ceniza de cascara de arroz
CLD	Ceniza de lodo de depuradora
DRX	Difracción de rayos X
DTG	Curva derivada termogravimétrica
FCC	Catalizador gastado de craqueo catalítico
FESEM	Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo
FRX	Fluorescencia de rayos X
GCOM	Geopolímero con silicato comercial
GRES	Geopolímero a partir de ceniza de cascara de arroz
GTDN	Geopolímero a partir de tierra diatomea natural
GTDR	Geopolímero a partir de tierra diatomea residual
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PC	Cemento Portland
Rc	Resistencia a la compresión
TD	Tierra de diatomea
TDN	Tierra diatomea natural
TDR	Tierra diatomea residual
TG	Termogravimetría

# **CAPÍTULO I**

**--\_ Revisión Bibliográfica \_--**

# 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este primer apartado se describe los aspectos más relevantes sobre el estado del arte de las materias primas utilizadas en la presente investigación, así como de sus características y propiedades puzolánicas. También se hace referencia a la influencia del sector de la construcción en el medio ambiente y la vulnerabilidad de las ciudades en países en desarrollo frente al cambio climático y al crecimiento de la población mundial, todo ello considerando los nuevos retos de la nueva agenda 2030.

## 1.1 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

Después de que La Asamblea General de Las Naciones Unidas en el año 1987 publicara el informe “Nuestro Futuro Común” [1] (también llamado informe Brundtland) sobre la perspectiva medioambiental hasta el año 2000, se han venido desarrollando varias cumbres con los jefes de estado o de gobierno para adoptar programas de acción ante esta situación. Es en la Cumbre del Milenio celebrada en Nueva York en el año 2000 donde se fijan los llamados “objetivos del milenio”, objetivos que pueden considerarse una antesala a lo que hoy conocemos como los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* (ODS).

Estos 17 ODS forman parte de la agenda 2030 que constituyen un llamamiento universal a la acción para erradicar la pobreza, proteger al planeta frente a las acciones antropogénicas, mejorar la calidad de vida y las perspectivas de las personas en todo el mundo, a través de acciones a

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

nivel mundial, acciones a nivel local y acciones por parte de las personas, todas ellas con el propósito de lograr el cumplimiento de estos objetivos.

A continuación, describimos algunos de los ODS (1, 11-13) que tienen alguna relación directa o indirecta con la presente tesis.

En lo referente al *ODS 1-Fin de la pobreza*, indica que la pobreza no solamente se trata de la falta de ingresos y recursos económicos para garantizar una vida digna, sino que tiene diferentes manifestaciones como el hambre, la malnutrición, la falta de una vivienda digna, el acceso limitado a otros servicios básicos como la educación o la salud, la discriminación, la exclusión social y la falta de participación de los pobres, en particular de la personas más vulnerables, en la toma de decisiones a nivel político-social.

El concepto de vulnerabilidad según El Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas la define como “un estado de elevada exposición a determinados riesgos e incertidumbres, combinado con una capacidad disminuida para protegerse o defenderse de ellos y hacer frente a sus consecuencias negativas”. Además, este concepto existe en todos los niveles y dimensiones de la sociedad, siendo una parte integrante de la condición humana [2].

Como lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles se encuentra el *ODS 11-Ciudades y comunidades sostenibles*. Se prevé que para el año 2030 el número de personas viviendo en las ciudades alcance un valor aproximado de 5000 millones debido a que el mundo está experimentando un crecimiento urbano sin precedentes.

Actualmente, son 883 millones de personas que viven en barrios marginales, sin servicios adecuados y esta cifra sigue en aumento, dando lugar a una mala planificación urbanística y como consecuencia produciendo grandes problemas para las ciudades principalmente en el coste económico.

El *ODS 12-Producción y consumo responsable*, nos hace un llamamiento a fomentar el uso eficiente de los recursos y la energía, debido a que el aumento en el consumo de los recursos naturales para satisfacer nuestro crecimiento conlleva en muchos casos contaminación del aire, el agua, el suelo y una sobreexplotación de los mismos. Se debe mejorar los servicios básicos a fin de reducir los costos para mejorar la calidad de vida de todos y reducir la pobreza, buscando nuevos materiales que no dañen al medio ambiente para la construcción de infraestructuras. Además, se necesita sensibilizar a los consumidores sobre la prevención, la reducción, reutilización y reciclaje para lograr una gestión sostenible y el uso eficiente de nuestros recursos naturales.

El *ODS 13-Acción por el clima*, alude al llamamiento sobre que el cambio climático no reconoce fronteras y afecta a todos los países en su conjunto y su impacto es mucho más negativo en los países en desarrollo, debido a su baja capacidad de planes de respuesta ante amenazas atmosféricas o escasos recursos económicos para hacer frente a estos cambios.

Desde 1990 se ha aumentado en casi un 50 % las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principal gas responsable del efecto invernadero. Es por ello que se necesita tener una actividad económica más sostenible y más respetuosa con el medio ambiente basada en una

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

economía donde se disminuyan drásticamente las emisiones de dicho gas [3].

Con la presente tesis al menos se pretende incidir en estos 4 objetivos descritos anteriormente, en cumplimiento de los nuevos retos buscados en los ODS. En la Figura 1 podemos observar los 17 ODS planteados por la ONU (Organización de las Naciones Unidas).



Figura 1 Los 17 Objetivos de desarrollo sostenible

Fuente: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

### 1.2 Déficit de la vivienda en países en desarrollo de América Latina

Tras el paso de 20 años de la celebración de Hábitat II (Estambul-Turquía 1996), en octubre de 2016 en Quito-Ecuador se celebró la última conferencia de las Naciones Unidas sobre Vivienda y Desarrollo Urbano

Sostenible conocida como Hábitat III, donde se aprobó la “Nueva Agenda Urbana” la cual propuso establecer lazos con la Agenda para el Desarrollo Sostenible 2030 para lograr el cumplimiento de los ODS, principalmente en el componente urbano descrito en el ODS 11.

En el reporte ciudades del mundo 2020 [4], se alude a una creciente concentración de la población en áreas urbanas y establece que este crecimiento aumentara en los próximos años. En el momento de la adopción de la Agenda 2030 en 2015, el 54 % (4000 millones) de la población mundial vivía en áreas urbanas y al final del período de 20 años que cubre la Nueva Agenda Urbana en 2036, se espera que la población mundial que resida en áreas urbanas sea del 62 % (5400 millones). En la Figura 2 podemos observar el % de la población que vive en la pobreza multifuncional (*personas que sufren carencias en las dimensiones: educación, salud, trabajo, seguridad social, vivienda y nivel de vida en general*) para el año 2018, siendo los países de África subsahariana los más desfavorecidos.



Figura 2 Población (%) que vive en pobreza multifuncional, 2018. Adaptada de [4]

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

El notable crecimiento y transformación económica de China está guiada por la planificación urbana y la industrialización, pero en países en desarrollo este crecimiento supone un modelo de urbanización insostenible [5].

Sin embargo, este crecimiento de las ciudades y el desafío de disponer de una vivienda adecuada es un problema en la mayoría de los países de todo el mundo, pero este problema se agrava más en los países en desarrollo debido a la carencia de recursos de las personas más vulnerables de la sociedad unido a la falta de planes o políticas nacionales que ayuden a reducir los asentamientos informales que van en aumento en las principales ciudades de América Latina.

Durante más de seis décadas, la vivienda inadecuada se ha vuelto endémica en las ciudades latinoamericanas, donde más de un tercio de la población aún no tiene una vivienda adecuada [6]. La migración campo-ciudad ha generado el crecimiento de las ciudades junto a la construcción de viviendas en asentamientos informales en tierras periurbanas y la mayoría de estas construcciones carecen de infraestructura de los servicios básicos (alcantarillado, agua, electricidad), siendo construcciones de las denominadas informales.

Según lo estimado por ONU-Habitat existen alrededor de 881 millones de personas viviendo actualmente en barrios pobres en ciudades de países en desarrollo y para el 2025, es probable que dicha cifra aumente hasta 1600 millones más de personas que requerirán una vivienda adecuada y asequible [5]. En la Figura 3 podemos observar la población urbana en América Latina viviendo en asentamientos informales según los datos estadísticos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe

(CEPAL) para el año 2014, siendo el Estado Plurinacional de Bolivia el que tiene el mayor porcentaje (43,5 %) de personas viviendo en esta situación de desigualdad.

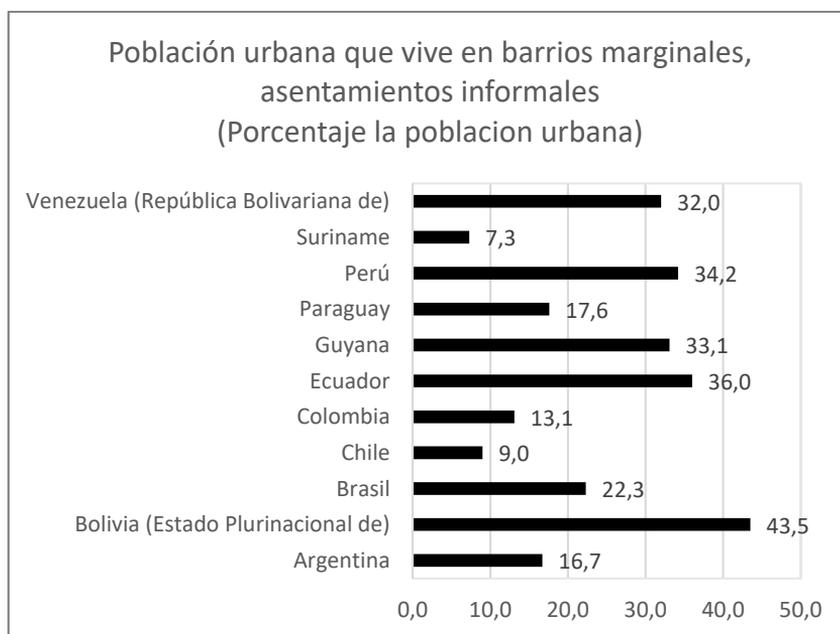


Figura 3 Población urbana que vive en barrios marginales

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), pone de manifiesto que el cambio climático tiene un impacto negativo en el crecimiento urbano de estas ciudades sin planificación, siendo los más pobres los más expuestos a un mayor riesgo debido entre otras razones a las siguientes:

- Mayor exposición a los peligros al vivir en llanuras o en terrenos inestables.
- Carecer de vivienda adecuada e infraestructuras que reduzcan estos riesgos al tratarse de autoconstrucciones sin respetar las normativas de construcción.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Menor ayuda estatal ante una catástrofe, debido a que estos asentamientos son considerados fuera del marco legal.
- Altos déficit de gobernabilidad, corrupción y menos recursos para enfrentar el cambio climático.

Se puede considerar una vivienda adecuada a aquella que cumple con los 7 requisitos mostrados en la Figura 4.

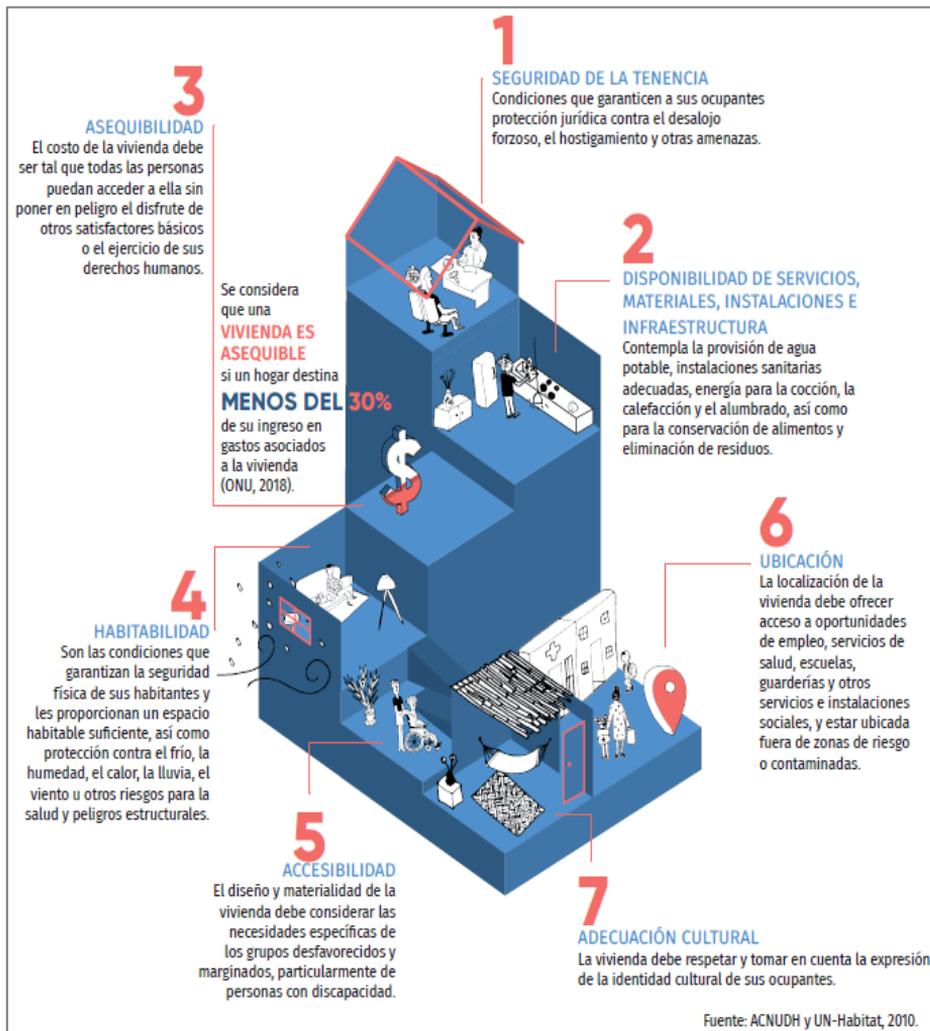


Figura 4 Requisitos para considerar una vivienda adecuada [7]

Pero el problema de la vivienda no solo se trata de déficit cuantitativo para la construcción de nuevas viviendas, sino también de un problema cualitativo debido a que las viviendas puedan carecer de uno o varios componentes para considerarlos de buena calidad.

### **1.2.1 Situación de la vivienda social en Bolivia**

Se ha escogido hacer una puntualización de la vivienda en Bolivia al tratarse del país de origen del doctorando y porque como se vio anteriormente en la Figura 3 es el país de América Latina con mayor número de personas viviendo en asentamientos informales. Según el informe de desarrollo humano 2019, el Estado Plurinacional de Bolivia se encuentra en el puesto 114 y en el Índice de Pobreza Multidimensional ocupa el puesto 11, siendo el 36,4 % de la población la que se encuentra por debajo del umbral de la pobreza [8], es decir aproximadamente 4,23 millones de los 11,61 millones de habitantes se encuentran en esta situación. Esta desigualdad puede tener diferentes orígenes entre los cuales podemos mencionar la diferencia de ingresos que reciben los trabajadores del sector formal respecto de los trabajadores informales tal como se observa en la Figura 5.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

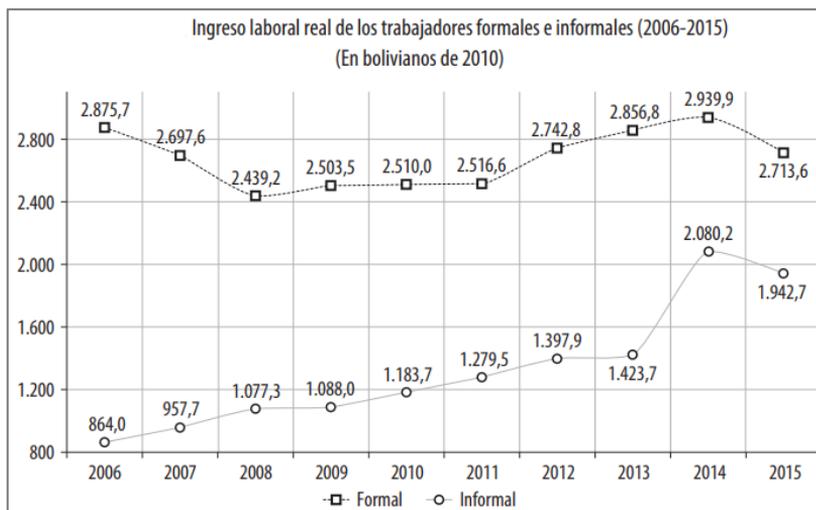


Figura 5 Diferencia de ingresos económicos entre trabajadores bolivianos [9]

Si se desea garantizar la dignidad humana y mejorar el índice de desarrollo humano, es fundamental lograr que las personas tengan un acceso a una vivienda adecuada, ampliando así la posibilidad de salir de una situación de vulnerabilidad.

En el último Censo llevado en el año 2012 por el Instituto Nacional de Estadística (INE) el déficit cuantitativo de viviendas hasta ese año había sido del 13,5 %, dato que equivale a 377660 viviendas [10]. En la Figura 6 podemos observar el porcentaje de las personas que habitan una vivienda inadecuada en cada uno de los 9 departamentos que tiene Bolivia, siendo el 31 % a nivel nacional las personas que se encuentra en esta situación.

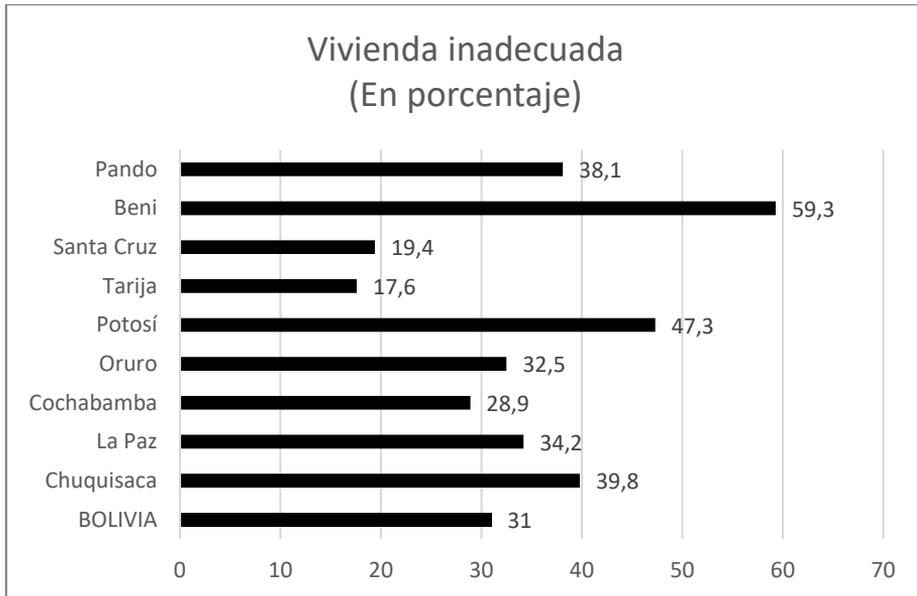


Figura 6 Personas bolivianas habitando en una vivienda inadecuada en el año 2012

### 1.2.2 Importancia de la vivienda de bajo costo

Dentro del marco internacional, el derecho al acceso de una vivienda digna es reconocido por la mayoría de gobiernos y es un derecho humano universal que tienen todas las personas, por esta razón, la vivienda adecuada está en el centro del desarrollo sostenible como un instrumento para lograr una urbanización incluyente, planificada y sostenible que sea capaz de afrontar los retos del cambio climático [7].

La importancia de tener una vivienda adecuada significa mejorar las condiciones de las personas que habitan en ella, para que estas personas puedan tener vidas productivas y saludables, siendo este un factor importante que puede reducir la exclusión social al evitar la fragmentación de las ciudades, además sirve para mejorar la economía

familiar y lograr un desarrollo urbano sostenible reduciendo la pobreza y mejorando los asentamientos precarios.

Finalmente, considerando la importancia que tiene la vivienda de interés social, con la presente tesis se pretende buscar materiales más económicos y accesibles al aprovechar la disponibilidad de los residuos utilizados en este contexto, que sirvan para la construcción de viviendas.

### **1.3 Eficiencia energética en los edificios**

Cada vez es más importante en la arquitectura actual buscar reducir el consumo interno de energía desarrollando Edificios de consumo de Energía Casi Nulo (EECN o nZEB en inglés) esto se logra entre otras medidas: mediante una arquitectura bioclimática, estudio de la tipología del edificio, respondiendo a las condicionantes climáticas, a la morfología urbana, etc. A continuación, se describen los 4 principios de diseño para un nZEB:

- Reducir la demanda de energía de todos los edificios de nueva construcción. Se entiende como demanda de energía a la suma de las demandas del edificio en calefacción, refrigeración, agua caliente, energía eléctrica, ventilación, iluminación y electrodomésticos.
- Mejorar la Calidad Ambiental Interior (IEQ), evitando un sobrecalentamiento mediante ventilación natural o mecánica para lograr el máximo confort térmico.
- Fijar un porcentaje de demanda de energía renovable, es decir aprovechar la energía procedente de fuentes renovables no

contaminantes resolviendo problemas de adecuación y almacenamiento de energía.

- Reducir el consumo total de energía primaria y las emisiones de carbono por año.

Se define a un nZEB como aquel edificio que produce el 30 % o más de su energía requerida mediante el uso de energía renovable in situ [11].

En la actualidad con la tecnología disponible en el mercado, existe programas de simulación energética de edificios que mediante algorítmicos nos predicen los patrones de consumo energético de un edificio de forma anual o mensual y además ayuda a los diseñadores al momento de elegir los tipos de materiales, los aislantes, la posición de las ventanas, la orientación del edificio respecto del sol, ayudan a definir las sombras que proyecta el edificio, se pueden incluir el clima del lugar donde se va a construir, etc. Gracias a estas complejas simulaciones, el diseñador puede conocer de antemano cómo se va a comportar el edificio antes de construirlo con una máxima eficiencia resultante debido a la minimización de la demanda de energía.

Por otro lado, a partir del año 2020 todos los nuevos edificios tienen que ser EECN como indica el Real Decreto 235/2013 de 5 de abril de la Unión Europea por el cual se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. La adopción de este Real Decreto nos exige cambios legislativos en el código técnico de la edificación [12], e introduce un cambio de paradigmas sobre el diseño de la industria de la construcción para poder reducir las emisiones nocivas de los edificios.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

El 17 de abril de 2018 el Parlamento Europeo ha aprobado la nueva directiva sobre el rendimiento energético de los edificios EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) para aumentar la eficiencia energética en el sector de la construcción para que en el 2050 todos los edificios de la Unión Europea sean sostenibles, considerando que el sector de la construcción genera alrededor del 9 % del PIB de Europa y representa 18 millones de puestos de trabajo directos [13].

En el mercado internacional existen instituciones que otorgan sellos de sostenibilidad en los edificios si cumplen una serie de requisitos para que el edificio sea considerado como más respetuoso con el medio ambiente y más eficiente energéticamente, además se valoran otros elementos como el entorno, los recursos naturales, uso y tipo de suministros de energía, componentes y materiales para su fabricación, reciclaje de los recursos naturales, etc. [12].

A continuación, se describen los sellos de sostenibilidad más prestigiosos en España, cada uno de ellos tienen su propia herramienta de cálculo del nivel de sostenibilidad.

- Certificación VERDE<sup>®</sup>, cuando un edificio mediante su diseño, construcción u operación, reduce o elimina los impactos negativos y puede crear impactos positivos en nuestro clima y entorno natural para mejorar la calidad de vida de los usuarios, esta herramienta fue desarrollada por el Green Building Council España.
- Certificaron LEED<sup>®</sup> (Líder en Eficiencia Energética y Diseño sostenible) es un estándar internacional desarrollado por el U.S. Green Building Council basado en normativas y criterios de los Estados Unidos que fomenta el desarrollo de edificios de alta

eficiencia mediante cinco áreas clave de la salud humana y el medio ambiente que son: Sitios Sustentables (SS), Ahorro de Agua (WE), Energía y Atmósfera (EA), Materiales y Recursos (MR) y Calidad Ambiental de los Interiores (IEQ).

- Certificación BREEAM® (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology) método desarrollado en el Reino Unido cuya evaluación consta de 10 categorías: Gestión, Salud y Bienestar, Energía, Transporte, Agua, Materiales, Residuos, Uso ecológico del suelo, Contaminación e Innovación [12].

Lograr edificios eficientes significa mejorar los niveles de confort y bienestar de los usuarios mejorando los problemas de salud asociado a unas condiciones climáticas interiores deficientes, especialmente entre los grupos más vulnerables como los niños, los ancianos y los enfermos. El ahorro de energía y las mejoras en la eficiencia energética de los edificios permitirían que numerosos hogares escaparan de la pobreza energética [13].

Por lo tanto, el hecho de proponer viviendas sociales para las personas más vulnerables de la sociedad no significa que se deba renunciar a los niveles de confort y bienestar de los usuarios, es por ello que los materiales a investigar en el presente deben cumplir ciertos requisitos técnicos y además poseer una larga vida útil.

### 1.4 Cemento portland y su impacto ambiental

La necesidad intrínseca del ser humano de protegerse del medio que le rodea le ha llevado a construir su refugio con los materiales que tienen a su disposición desde sus inicios hasta la actualidad cambiando los materiales usados dependiendo de distintas épocas o periodos.

En la actualidad, esa misma necesidad continúa existiendo, pero con mayor complejidad debido al continuo crecimiento poblacional que nos demanda el mantenimiento y la construcción de nuevos edificios, como también de nuevas infraestructuras para desarrollar nuestras actividades. El sector de la construcción tiene una relación importante con el consumo de muchos materiales, principalmente por el cemento Portland cuyo descubrimiento se hizo en Inglaterra en 1824 por Joseph Aspdin.

El descubrimiento del cemento Portland (PC) ha cambiado nuestra forma de construcción y recientemente en 2019 su consumo ha superado los 4100 millones de toneladas [14], esta tendencia en la producción probablemente continuará creciendo en el futuro debido a su uso en la construcción de edificios e infraestructuras [15], de hecho, el cemento es el segundo material más utilizado en masa después del agua [16].

Aproximadamente, por tonelada de cemento portland producido se emite a la atmósfera entre 0,8-0,9 toneladas de CO<sub>2</sub>. Debido a su masiva producción, este material representa directamente del 5 al 8 % de las emisiones antropogénicas globales de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera [17], lo que implica un gran daño medioambiental agravando seriamente el problema del cambio climático.

En la Figura 7 se representa la producción del cemento en diferentes regiones del mundo, siendo China el primer productor con 2200 millones de toneladas, seguido por la India y Vietnam con 320 y 95 millones de toneladas métricas respectivamente. No se representan los valores de China para mantener una escala adecuada.

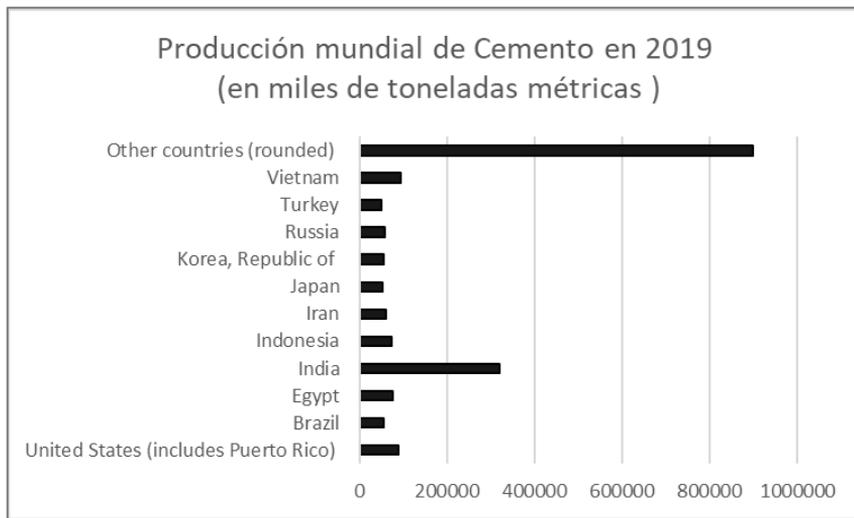


Figura 7 Producción de cemento en diferentes países. A partir de [14]

Ante esta situación diferentes investigadores han propuesto varias medidas para reducir el impacto producido por las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por parte de la industria de la construcción. Una de las alternativas más ampliamente investigadas es la posibilidad de la sustitución parcial del PC por materiales alternativos comúnmente denominados adiciones minerales o puzolanas, tal es el caso del metacaolín, humo de sílice y nano-sílice entre otros, muchas de estas adiciones que incluyen desechos derivados de otras industrias, como subproductos industriales tipo las cenizas volantes o desechos de biomasa como cenizas de cáscara de arroz. En las últimas décadas, la aparición de

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

nuevos conglomerantes como los geopolímeros o cementos de activación alcalina han supuesto una auténtica revolución en cuanto a la posibilidad de emplear materiales capaces de reemplazar por completo el uso del PC [18].

La producción de cemento es una de las actividades industriales más difíciles de descarbonizar [19], en gran medida debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la conversión química en el horno de CaCO<sub>3</sub> (carbonato cálcico) a CaO (óxido de calcio), además de necesitar una alta demanda de energía para alcanzar las temperaturas de conversión de las materias primas en clinker dentro del horno.

Al utilizar la cal como conglomerante en lugar del cemento portland se puede reducir en parte la cantidad de energía necesaria. Para la conversión de carbonato en cal se necesita una temperatura entre los 800 y 1000 °C a diferencia de los 1500 °C necesarios para la formación de los constituyentes del clinker.

Por todos estos inconvenientes ambientales asociados al cemento, existe la necesidad de diseñar nuevos conglomerantes con bajo o nulo contenido de PC que ayuden a la economía circular en el sector del hormigón [20], promoviendo tal y como se observa en la Figura 8 el uso de residuos de diferentes industrias en la fabricación de hormigón.

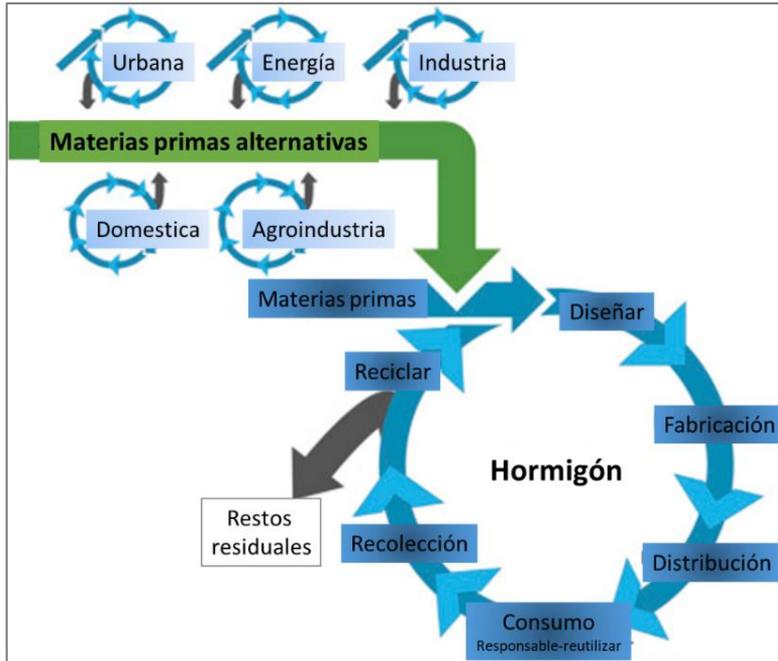


Figura 8 Economía circular aplicada al hormigón. Adaptada de [20]

Normalmente se han empleado residuos industriales como materiales suplementarios, los más conocidos son la escoria y la ceniza volante. El uso de desechos agrícolas como materiales suplementarios es relativamente más novedoso pero es importante porque el uso de los mismos promueve la sostenibilidad ambiental de la industria [21].

### 1.5 Antecedentes históricos de la cal

Hasta la fecha no se conoce con exactitud o los datos resultan confusos para definir el inicio del uso de la cal, algunos investigadores lo sitúan muy al comienzo de la historia del hombre con el descubrimiento del fuego en la prehistoria, otros investigadores aproximan el comienzo de su uso sobre el año 6000 a.C. empleada por las culturas del Çatal Hüyük en Anatolia, la actual Turquía, y en Warka, antigua Uruk (Iraq) [22].

En épocas posteriores diferentes civilizaciones hacen uso de la cal en sus construcciones, entre las cuales podemos mencionar a los mesopotámicos, los egipcios en la pirámide de Keops, los celtas, los griegos con revocos y enlucidos, los chinos en gran muralla china, etc. Pero en esas épocas esta técnica todavía se encuentra poco evolucionada. En el primer tratado de arquitectura escrita por Vitruvio en su libro "Diez libros de arquitectura" escribe sobre el uso y las propiedades de los morteros de cal y como este debe ser aplicado en varias capas de morteros, recomienda también su dosificación en función de la calidad de la arena, esta puede ser una parte de cal por tres de arena, o de dos por cinco, además menciona el empleo de aditivos como cenizas volcánicas, la teja triturada o tierra cocida, etc.

Los helénicos también tenían morteros de cal-arena y polvo volcánico o "Tierra de Santorin" obtenida en Théra [23], pero son los romanos los herederos de la tecnología de construcción griega quienes hicieron la mayor contribución a la tecnología de la cal mediante la adición de cenizas volcánicas ricas en sílice, para mejorar sus propiedades. Con el uso de esta puzolana se obtenía un material que fraguaba bajo el agua a diferencia de la cal viva que sin ninguna adición únicamente fraguaba al

aire, esta adición probablemente constituye el primer conglomerante hidráulico en la historia [22].

Durante la edad media, la técnica de los romanos fue parcialmente olvidada, limitándose su empleo en lugares donde abundaban estos materiales con propiedades puzolánicas, además en este período no hubo ningún progreso técnico notable.

Los morteros de cal históricos están compuestos por tres componentes, de los cuales dos son las fracciones principales: el carbonato de calcio y los agregados (esencialmente sílice); y el tercer componente es una fracción menor de finos (arcillas). En la Figura 9 podemos observar el espectro de difracción de rayos X de un mortero histórico de cal con la identificación de algunos componentes principales (cuarzo y calcita) junto con algunos otros componentes menores, como la arcilla (moscovita) y el feldespato [24].

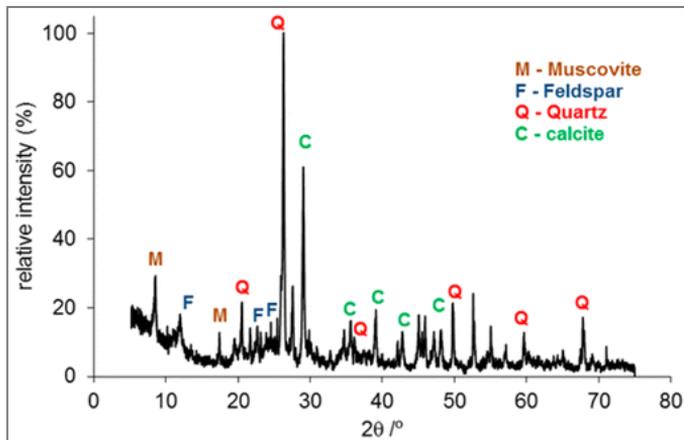


Figura 9 Espectro de DRX de un mortero histórico de cal [24]

El descubrimiento de los ligantes hidráulicos modernos se remontan a 1756 tras los trabajos experimentales de Smeaton para el faro de

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

Eddystone. Con la revolución industrial se abre nuevas posibilidades para el empleo de la cal, dando origen a dos corrientes. Por un lado, en Inglaterra con el descubrimiento del cemento Portland (1824) y, por otro lado, en Francia de la mano de Vicat con el perfeccionamiento de las cales hidráulicas. Las cales hidráulicas pueden ser consideradas como productos intermedios entre la cal hidratada y el cemento Portland actual. La Exposición Universal de 1851, permitió al cemento una demostración de las bondades del producto adquiriendo gran publicidad y el uso de la cal fue reemplazada progresivamente por el cemento debido a que este ofrece mayores resistencias a edades cortas de curado y además posee propiedades hidráulicas superiores a diferencia de la cal que tiene un proceso lento de fraguado y endurecimiento.

A mediados de la década de 1990 existe un uso creciente de la cal debido a que este material es más amigable con el medio ambiente [25] y dentro del sector de la construcción es utilizado principalmente para la restauración de edificios patrimoniales.

### **1.5.1 La cal**

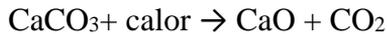
La cal por su gran gama de aplicaciones es uno de los productos químicos más versátiles del mundo y existe dos tipos principales de producción, la cal viva y cal hidratada, la primera se forma con la calcinación de la piedra caliza y la segunda es el resultado de la hidratación posterior de la cal viva [25].

En la norma cales para la construcción UNE-EN 459-1 [26] la define como: “Óxido de calcio y/o hidróxido de calcio, y óxido de calcio y magnesio y/o hidróxido de calcio y magnesio, producidos por la

descomposición térmica (calcinación) del carbonato de calcio natural (por ejemplo: caliza, creta, conchas) o del carbonato de calcio y magnesio natural (por ejemplo: caliza dolomítica, dolomita)”.

Se conoce bajo el nombre del ciclo de la cal a las transformaciones que sufre la piedra caliza para la producción de cal hasta concluida la formación de los compuestos conglomerantes en obra. En la Figura 10 se muestra dicho proceso, pudiendo en teoría repetirse indefinidamente.

El proceso empieza con el carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) que se calcina hasta unos  $900\text{-}1000\text{ }^\circ\text{C}$  y se produce la siguiente reacción:

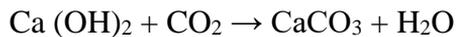


Si la temperatura de calcinación sobrepasa los  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , se forma la cal quemada, que es inactiva e incapaz de endurecerse.

El óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) es la llamada cal viva. Sólido amorfo con gran avidez por el agua, con la que reacciona para transformarse en un hidróxido que se denomina cal apagada:



Finalmente se usa la cal apagada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para que reaccione con el  $\text{CO}_2$  del aire, formando el  $\text{CaCO}_3$  que le confiere propiedades conglomerantes.



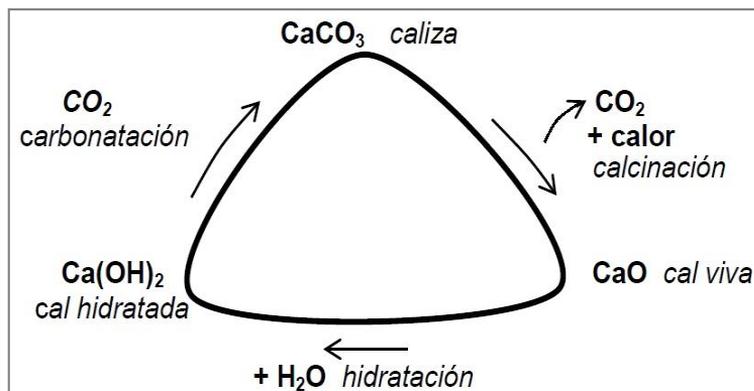


Figura 10 Ciclo de la cal [22]

No se conoce con exactitud la producción de cal a nivel mundial porque los datos de los distintos países son difíciles de obtener, sin embargo, en 2019 la producción mundial estimada es de 430 millones de toneladas, siendo China el mayor productor con 300 millones de toneladas, seguido por los EE.UU. y la India con 18 y 16 millones de toneladas respectivamente [14]. En la Figura 11 se muestra la producción mundial de cal (cal viva, cal hidratada y dolomita calcinada), China no se representa en el gráfico para que la escala puede ser visible.

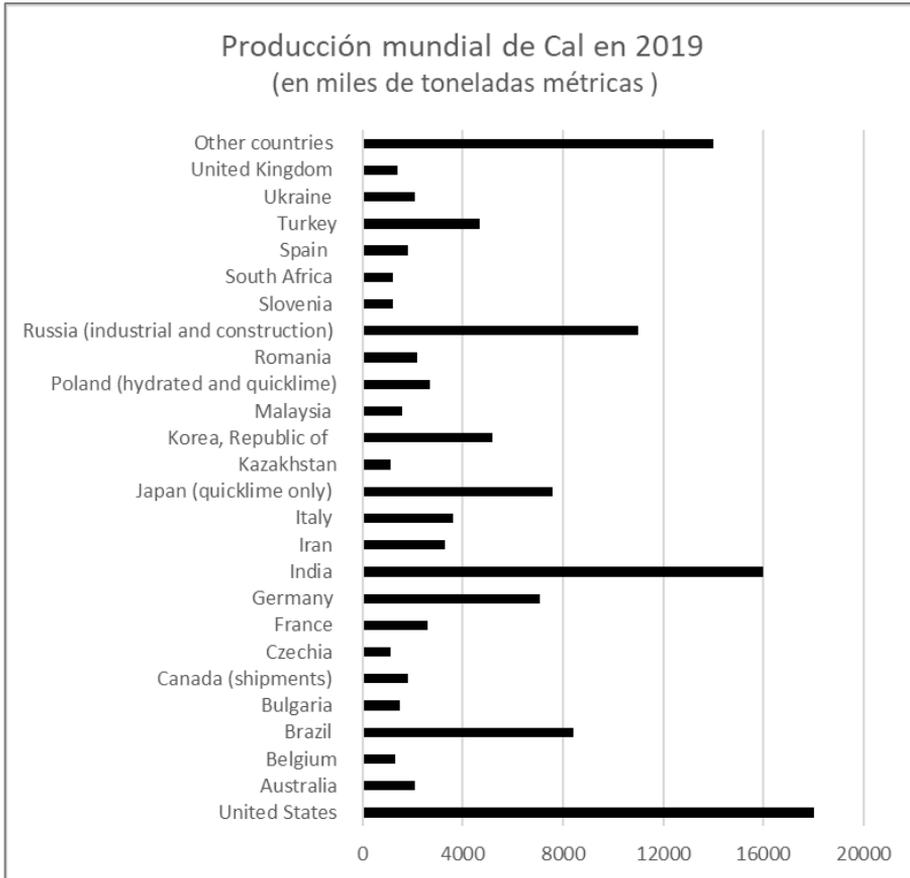


Figura 11 Producción de la cal en el mundo. A partir de [14]

### 1.5.2 Tipos de cal

Los tipos de cales dependen de la composición química de la materia prima utilizada durante su fabricación, siendo los parámetros más significativos el contenido de los compuestos de magnesio y de los compuestos arcillosos. En la norma UNE-EN 459-1 [26] cales para la construcción las clasifica según su composición química en dos grupos:

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

1- *CALES AÉREAS*, Producidas por la calcinación de calizas o dolomías, constituidas por óxido o hidróxido de calcio y/o magnesio. Carecen de propiedades hidráulicas ya que no tiene la propiedad de fraguar y endurecer cuando se mezcla con agua y/o bajo ella.

- Cales vivas (Q):

Compuestas por óxidos de calcio y de magnesio. Obtenidas tras la calcinación de la piedra caliza o las dolomías.

- Cales hidratadas (S):

Resultantes del apagado de las cales vivas, compuestas por hidróxidos de calcio y magnesio, las cales vivas e hidratadas pueden ser:

a) Cales cálcicas (CL) o cales grasas: Calcinación de rocas calizas puras, tienen un contenido inferior al 5 % de óxido de magnesio

b) Cales dolomíticas (DL) o cales magras: Calcinación de piedras dolomíticas que contienen óxido de magnesio mayor al 5 %.

2- *CALES CON PROPIEDADES HIDRÁULICAS*, Se fabrica a partir de piedras calcáreas con un contenido en arcillas (silicatos y aluminatos de calcio) superior al 5 %, u otro añadido sin que supere el 20 %, tienen la propiedad de fraguar y endurecer cuando se mezcla con agua y/o bajo ella.

Su temperatura de calcinación es superior a 1000 °C debido a que en estas temperaturas los silicatos y los aluminatos que componen la arcilla se descomponen y reaccionan con el óxido de calcio, formando productos que en contacto con el agua cristalizan como hidratos.

Las cales hidráulicas se dividen en tres subfamilias:

- Cal hidráulica natural (NHL):

Es una cal con propiedades hidráulicas producida por la calcinación de calizas más o menos arcillosas o silíceas (incluyendo la creta) con reducción a polvo mediante apagado con o sin molienda. Las propiedades hidráulicas son el resultado exclusivo de la composición química especial de la materia prima natural. Se permiten los agentes de molienda hasta el 0,1 %. La cal hidráulica natural no contiene ninguna otra adición.

- Cal formulada (FL):

Es una cal con propiedades hidráulicas constituida principalmente por cal aérea (CL) y/o cal hidráulica natural (NHL) con material hidráulico y/o puzolánico añadido.

- Cales hidráulicas (HL):

Es un conglomerante constituido por cal y otros materiales tales como cemento, escorias de alto horno, cenizas volantes, fíller calizo y otros materiales adecuados [26].

En la Figura 12 podemos observar la clasificación de la cal para la construcción.

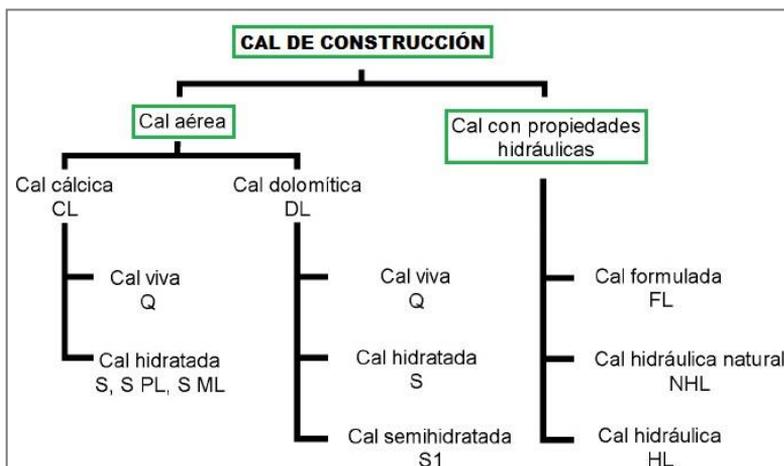


Figura 12 Clasificación de Cales de Construcción. A partir de [26]

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

Como la piedra caliza es la materia prima para la fabricación de la cal y del cemento, se trata de una cal cuando la formación de silicatos y aluminatos de calcio no eliminan la presencia de una cantidad importante de óxido de calcio libre (CaO), cuando esto ocurre dejamos de estar ante una cal y nos encontramos con un cemento.

### 1.5.3 Propiedades de la cal

Según la Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados España (ANCADE) las ventajas de los morteros de cal son:

- Menor retracción
- Menor fisuración
- Menor rigidez mecánica
- Plasticidad superior al del cemento
- Ausencia de retracción, buena plasticidad y trabajabilidad.
- Gran elasticidad que evita fisuras, permeabilidad apreciable al vapor de agua, buena resistencia a la penetración de agua de lluvia.
- Buen aislamiento térmico y acústico, ausencia de eflorescencias, producto desinfectante y fungicida natural.
- No se necesita más aditivos que los áridos

### 1.5.4 Usos y aplicaciones de la cal

Si bien el consumo de la cal en la construcción es reducido, no ha perdido su importancia como producto industrial.

En la Figura 13 podemos observar las principales industrias que hacen uso de la cal en el año 2014, datos proporcionados por el reporte de actividades de EuLA (Asociación Europea para la Cal), siendo su principal consumidor la industria siderúrgica con el 40 % y para el sector de la construcción solo el 10 %.

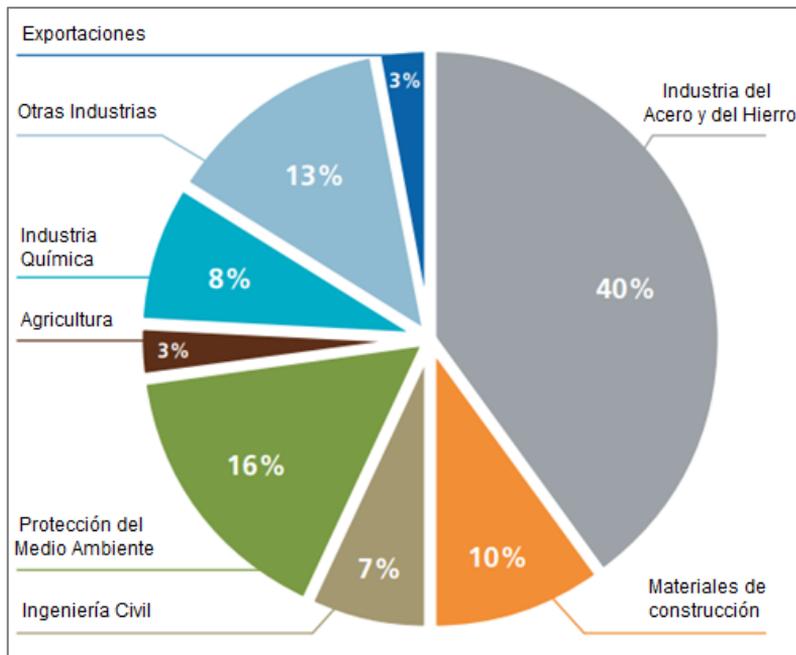


Figura 13 Resumen de los principales mercados de la cal. Adaptada de [27]

### 1.6 Antecedentes históricos de la activación alcalina

El concepto de alkali activated material (AAM) en castellano material activado alcalinamente se conoce aproximadamente desde al menos el año 1908. Patentado por el ingeniero alemán Kuhl como una alternativa al cemento portland, su durabilidad se ha demostrado durante varias

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

décadas en obras presentes en la antigua URSS, Bélgica, Finlandia, China, y más recientemente en Australia.

Pero las principales investigaciones respecto a los materiales activados alcalinamente han surgido de forma internacional a partir de los años 1990 y la mayor parte de ellas se ha centrado a nivel microestructural y propiedades mecánicas con poco énfasis sobre estudios de durabilidad y su vida útil [28].

Desde la década de 1970 se ha dado un rápido avance en las mezclas de polímeros que han mejorado las propiedades del hormigón moderno a base de cemento, también en la década de los años 1980 se acuñó el término geopolímero por Joseph Davidovits para designar a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización.

En la actualidad son varios los grupos de investigación que van desarrollando y ampliando esta área del conocimiento en busca de soluciones a la crisis energética y a los gases de efecto invernadero producido por la fabricación del cemento portland. Existe un grupo dentro de la RILEM ("Durability testing of alkali-activated materials-Technical Committee 247-DTA") liderado por el Prof. John L. Provis, el cual pretende hacer un estudio exhaustivo sobre los diferentes ensayos de durabilidad que pueden someterse estos materiales activados alcalinamente con el fin de establecer unas normas específicas para dichos materiales [29].

Las propiedades de los cementos activados con álcali dependen de las características de las materias primas utilizadas y de la dosis de los activadores, cuando estos están bien dosificados tiene excelentes propiedades mecánicas, microestructura menos porosa que las matrices

con cemento y buena resistencia a los ataques de soluciones agresivas [30].

### **1.6.1 Activación alcalina**

La activación alcalina es una reacción química de polimerización inorgánica donde un material sólido de tipo silicoaluminoso (precursor), mezclado con una solución de elevada alcalinidad (activador), forma un material con propiedades cementantes conocido como geopolímero o polímero inorgánico [31].

Hasta ahora, los precursores que se han estudiado principalmente para la síntesis de estos nuevos conglomerantes han sido escorias de alto horno, cenizas volantes de la combustión de carbón y el metacaolín. En referente a los activadores alcalinos utilizados mayormente son hidróxidos de sodio o potasio y silicatos de sodio o potasio [32].

### **1.6.2 Clasificación de los métodos de activación alcalina**

La clasificación propuesta por Glukhovsky y Davidovits dependen de la composición química de la materia prima y del grado de alcalinidad de la solución activante. De manera simplificada, podemos clasificar a los conglomerantes activados alcalinamente como:

- Materiales ricos en  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  este grupo es el estudiado por Glukhosky y está representado principalmente por la activación alcalina de las escorias de alto horno. Las soluciones alcalinas presentan bajas concentraciones y los productos de reacción formados son fundamentalmente silicatos cálcicos

hidratados o SCH ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-nH}_2\text{O}$ ). Dependiendo de la composición de los materiales de partida pueden ser: a) sistemas de unión alcalina  $\text{Me}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  o b) sistemas de unión “alcalino-alcalinotérreo”  $\text{Me}_2\text{O} - \text{MO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  (donde  $\text{Me} = \text{Na, K, ...}$  y  $\text{M} = \text{Ca, Mg, ...}$ ) [33].

- Materiales ricos en  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  este grupo es estudiado por Davidovits y en este caso las materias primas utilizadas en la activación alcalina son las cenizas volantes con bajo contenido en CaO y el metacaolín. Es necesaria la utilización de soluciones muy concentradas y los productos de reacción son estructuras amorfas de tipo gel aluminosilicato de sodio hidratado o N-A-S-H ( $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2 - \text{nH}_2\text{O}$ ) y algunas estructuras de tipo zeolítico.
- Finalmente, una combinación de los dos anteriores. El principal producto de hidratación obtenido sería un nuevo conglomerante denominado cemento alcalino híbrido, formado a partir de la activación alcalina de materiales con contenidos de CaO,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 20\%$  [33].

En nuestro estudio nos centraremos en el segundo grupo descrito por Davidovits, debido a que las materias primas utilizadas en esta investigación tienen esta composición química, dicha composición es muy similar al metacaolín.

### 1.6.3 Proceso de activación alcalina

El modelo fue propuesto por Glukhosky en la década de 1950 y consta de tres etapas que se describen a continuación:

- Primera etapa: Destrucción/coagulación: esta primera etapa se caracteriza por la disolución y/o ruptura de los enlaces Si-O-Si, Al-O-Al y Al-O-Si de la materia prima de origen silicoaluminoso, provocado por el incremento del pH en el medio acuoso.
- Segunda etapa: Coagulación/condensación: en esta segunda etapa los productos disgregados se acumulan, formando una estructura de coagulación en la que se producen los procesos de policondensación.
- Tercera etapa: Condensación/cristalización: en esta etapa se genera el producto final de reacción. De esta manera, las partículas condensadas, así como el material silicoaluminoso sin reaccionar, precipitan para formar el conglomerante activado alcalinamente.

En 2005, Fernández y Palomo [33] propusieron un modelo gráfico para describir el desarrollo microestructural de los conglomerantes activados alcalinamente basándose en los resultados obtenidos mediante RMN (Resonancia magnética nuclear) y FTIR (Espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier), así mismo describe las diferentes etapas presentes en la activación alcalina de los materiales silicoaluminosos que son similares a la síntesis de las zeolitas y que están en concordancia con el modelo de Glukhovsky tal como se observa en la Figura 14.

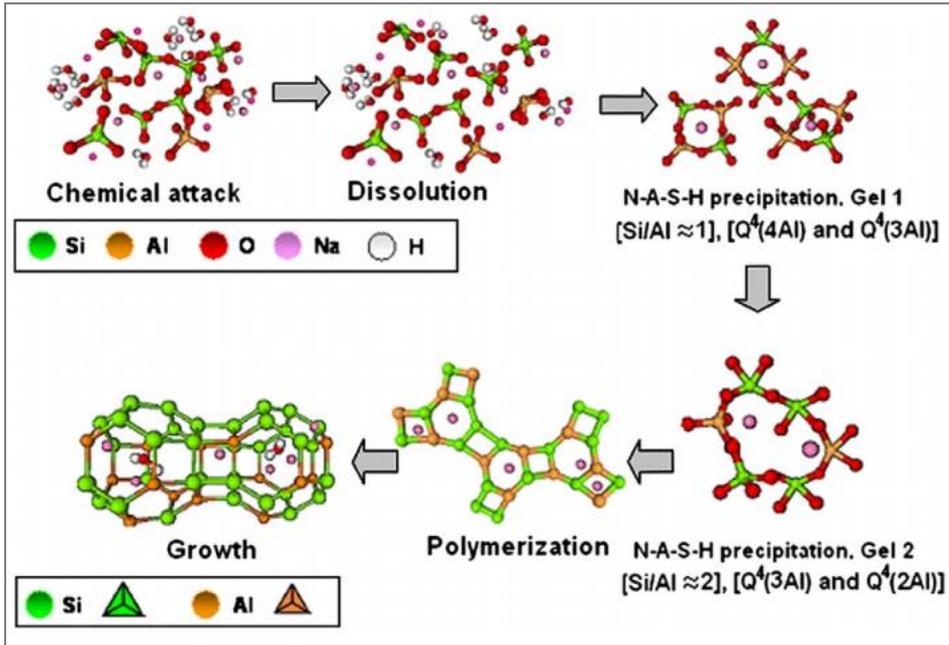


Figura 14 Modelo descriptivo de la activación alcalina de materiales silicoaluminosos [33]

#### 1.6.4 Activadores Alcalinos

Los activadores alcalinos generalmente son sales alcalinas o soluciones cáusticas que se usan normalmente como activadores alcalinos en cementos y hormigones activados con álcalis, pero también una variedad de subproductos industriales y desechos [33]. Además puede ser: hidróxidos alcalinos, silicatos, carbonatos, sulfatos, aluminatos u óxidos, esencialmente cualquier sustancia soluble que puede suministrar los cationes de metales alcalinos para elevar el pH de la mezcla de reacción [29].

Glukhovsky clasifica en 6 grupos en función de su composición química [34].

- Disoluciones cáusticas: MOH
- Sales ácidas débiles:  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF
- Silicatos:  $M_2O.nSiO_2$
- Aluminatos:  $M_2O.n Al_2O_3$
- Aluminosilicatos:  $M_2O. Al_2O_3.SiO_2$
- Sales de ácidos fuertes:  $M_2SO_4$

Las mezclas hidróxido de sodio o potasio con silicato de sodio o potasio son de las más utilizadas como activadores alcalinos, las funciones de las sustancias activadoras dentro del geopolímero deben ser las siguientes [35]:

- Acelerar la solubilización de la materia prima
- Favorecer la formación de hidratos estables de baja solubilidad
- Favorecer la formación de una estructura compacta con estos hidratos formados

Solamente cuando el pH de los activadores alcalinos es superior a 12 se consigue, no simplemente la disolución de la materia prima, sino también la formación de compuestos hidratados estables [29], es decir cuanto mayor es el pH, mayor es la solubilidad de los iones de silicato y en consecuencia se puede esperar que aumente la velocidad de la reacción a medida que aumenta la alcalinidad [33].

En este trabajo para fabricar el geopolímero comercial el activador alcalino será una mezcla de hidróxido sódico con silicato sódico y agua.

### 1.6.5 Activadores Alternativos

Si bien los cementos activados alcalinamente son una alternativa para reducir los costes energéticos del cemento portland, no se puede afirmar que los cementos alcalinos se basen en una química “limpia” con el medioambiente, debido a que los procesos de producción de las disoluciones alcalinas tales como los silicatos sódicos (1300 – 1500 °C) emiten grandes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera además de ser un proceso costoso económicamente [29] [36]. En la Figura 15 podemos observar el esquema de su fabricación.

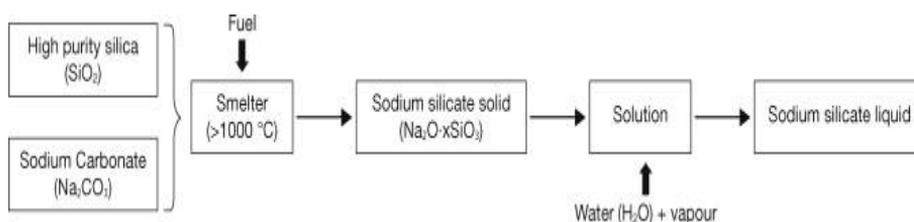


Figura 15 Proceso de fabricación del silicato de sodio comercial [37]

Por este motivo diferentes investigadores han estudiado otros activadores obtenidos a partir de subproductos industriales o desechos agrícolas para la elaboración del silicato de sodio/potasio, como alternativa a los silicatos comerciales.

Entre estas fuentes alternativas podemos mencionar la ceniza de cascara de arroz [38], [39], los residuos vítreos urbanos e industriales [40], la tierra de diatomea [41], la ceniza de la paja de caña de azúcar [42], residuos de hormigón [43], biomasa provenientes de la combustión de cáscara de almendra y alpeorujo (subproducto producido en la extracción de aceite de oliva compuesto por partes sólidas de la aceituna y grasas

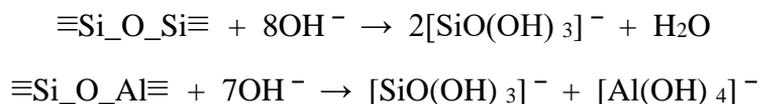
vegetales) [44], residuos del corte de la piedra (mármol, piedra volcánica) [45].

Finalmente, en este trabajo para la elaboración de los geopolímeros alternativos se propone la utilización de la ceniza de cascara de arroz y la tierra de diatomea. Estos materiales actúan como fuente de sílice para que reaccionando con el NaOH produzcan silicato sódico.

### 1.7 Puzolanas utilizadas en la investigación

Diversos estudios han demostrado el uso de puzolanas en diferentes civilizaciones antiguas, pero su mayor logro se asocia al Imperio Romano de hecho, el uso del término puzolana cuyo nombre deriva de un municipio en una zona volcánica cerca de Nápoles (Pozzuoli), pero en tiempos de los romanos no solo se utilizaban puzolanas naturales sino también puzolanas artificiales (ladrillo molido). Una puzolana es un material principalmente amorfo de naturaleza silíceo o silicoaluminosa, el cual posee de por sí baja o nula capacidad cementante, pero que reacciona con hidróxido cálcico  $\text{Ca(OH)}_2$  en presencia de agua, a temperatura ambiente, generando compuestos con propiedades cementantes [46].

Una solución saturada de hidróxido de calcio tiene un pH de 12,45 a 25 °C, con una alta concentración de iones  $\text{OH}^-$  que causa la ruptura de enlaces en  $\text{SiO}_2$ , silicatos y aluminosilicatos, produciendo iones simples acuerdo con el siguiente esquema:



## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

Los iones silicato y aluminato resultantes en contacto con iones  $\text{Ca}^{2+}$  forman silicatos hidratados denominados abreviadamente como SCH, aluminatos cálcicos hidratados tipo  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ , la gehlenita hidratada  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  y  $\text{C}_3\text{ACaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Los componentes de silicato se disuelven más rápidamente que el aluminato y una mayor concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  es necesaria para la formación de aluminato de calcio [47].

El contenido en óxidos de carácter ácido en la puzolana deberá ser elevado. Dichos óxidos pueden ser: el óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Esta reacción puzolánica depende de la composición química y mineralógica de la puzolana, del tipo y la proporción de sus fases activas, como también del área de superficie específica de la partícula, la relación de cal/puzolana, el contenido de agua, el tiempo y temperatura de curado [48].

Durante la última década, se han publicado varios artículos sobre puzolanas activadas con álcali, especialmente cementos de cenizas volantes activadas con álcali y conglomerantes de metacaolín activados con álcali [33].

### **1.7.1 Catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC)**

En los últimos cincuenta años, el crecimiento de los sectores industrial, comercial y agrícola ha requerido un gran aumento en la producción de productos petroquímicos e intermedios, así como combustibles refinados como gasolina, diésel, queroseno, combustible para aviones, nafta y gasóleo. Esta situación condujo al uso masivo de catalizadores para procesos de refinería como: hidrotratamiento (HT), craqueo catalítico

fluido (FCC), reformado catalítico (CR), hidrodesulfuración (HDS), alquilación, isomerización [49].

El craqueo catalítico es un proceso de la industria petroquímica, cuyo objetivo es la modificación de la estructura molecular de ciertos hidrocarburos, particularmente para obtener naftas con características antidetonantes deficientes y convertirlas en combustibles para automotores de calidad extra, o para producir compuestos aromáticos, en especial de ocho átomos de carbono, así como benceno y tolueno a partir de naftas seleccionadas [50], es decir transformar esos cortes pesados (crudo reducido o un gas oíl pesado) en otros más livianos como la gasolina.

Existen tres tipos principales de craqueo (cracking/desintegración) y son: pirolisis, desintegración catalítica e hidrólisis, pero hoy en día todos los procesos de craqueo catalítico que se pueden clasificar en unidades de lecho móvil o de lecho fluidizado.

El catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC, del inglés fluid catalytic cracking) está conformado principalmente por un componente activo (zeolita Y-tipo faujasita), en una matriz de naturaleza silicoaluminosa de naturaleza amorfa. Su composición química es básicamente sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en porcentajes de hasta un 90 % [51], además este material actúa como una puzolana muy activa desde las primeras edades de curado y su reactividad mejora tras someterse a un proceso de molienda para reducir su tamaño de partícula hasta un diámetro medio de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ . Al incorporar el FCC en matrices cementantes no aumenta el calor de hidratación pero si acelera los procesos de hidratación [52], contribuyendo a la mejora de las

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

resistencias mecánicas, estas mejoras podrían atribuirse a su alta actividad puzolánica [53].

Por su composición química, los investigadores mencionan que el FCC es un material similar al metacaolín (MK), tiene una alta capacidad para fijar la cal sobre todo en edades muy cortas de curado cuando se utiliza como sustituto del cemento [54].

La efectividad como material puzolánico del FCC y el MK en morteros de cal aún no se ha investigado con profundidad, sin embargo el estudio de Arizzi y Cultrone [55], demostró que el FCC tiene una menor actividad puzolánica que el MK cuando se agregó a los morteros de cal, atribuyendo al tamaño mayor de las partículas del FCC como punto negativo y que da lugar a resistencias mecánicas más bajas que los morteros cal/MK. En este estudio se prepararon morteros con cal CL90S y arena de sílice cuya relación cal/árido fue de 1/3, con sustituciones de cal en peso del 10, 15 y 20 % tanto del MK como de FCC, la cantidad de agua estaba en función de la finura de las partículas y del porcentaje de sustitución, a mayores porcentajes requieren más demanda de agua, aunque el MK requiere un contenido de agua ligeramente mayor que FCC. A partir del estudio de termogravimetría se detectaron las siguientes fases hidratadas tal como se observa en la Figura 16 representado para el 10 % de sustitución en los morteros después de 28 días y 4 meses de curado, donde cada área identificada es:

área-1)  $T < 100$  °C, debido a la pérdida de agua adsorbida, en forma de OH

área-2)  $T = 100 - 165$  °C, atribuido a la deshidratación de SCH

área-3)  $T = 220 - 270$  °C, atribuido a la deshidratación de las fases de aluminato

área-4)  $T = 360 - 470$  °C, atribuido a la deshidroxilación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

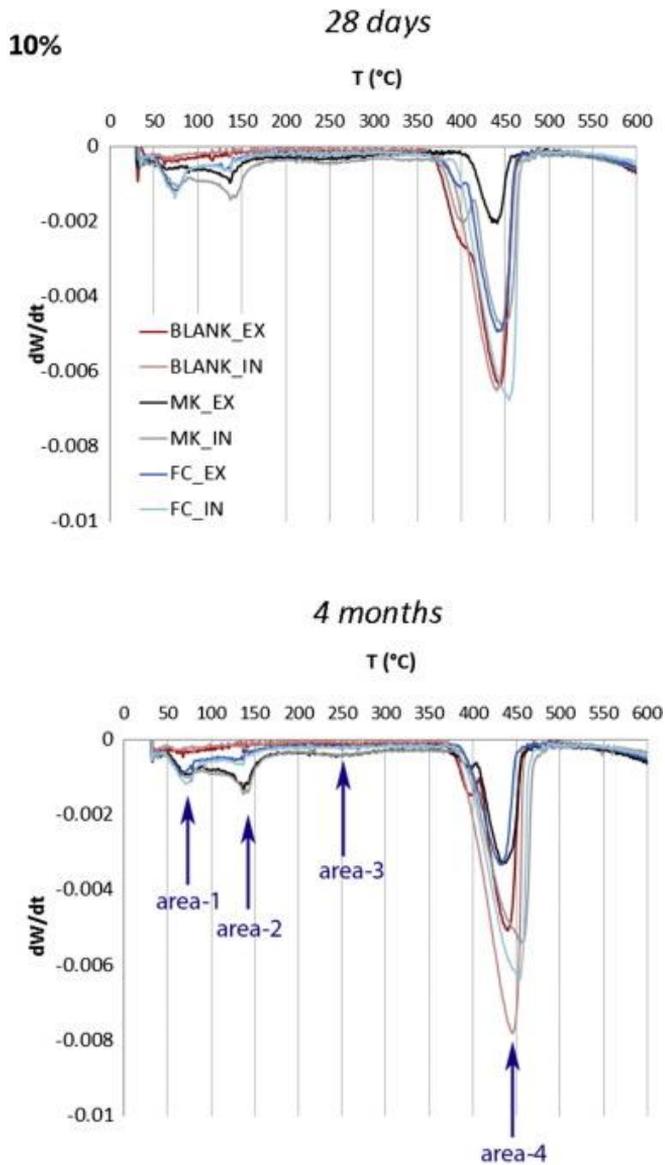


Figura 16 Curvas DTG de las zonas externas (ex) e internas (in) [55]

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

Según la intensidad de los picos los autores mencionan que existe más fases SCH y fases de aluminato en las mezclas con MK en comparación con las mezclas FCC.

Sobre la resistencia a la compresión podemos mencionar que, a mayor tiempo curado y a mayor porcentaje de sustitución, existe mayor resistencia a la compresión respecto del mortero control, sin embargo, el FCC tiene menores resistencias que el MK y muy similares al del mortero control.

Tashima et al. [56], demostraron la viabilidad de producir geopolímeros basados en FCC cuando se activó con álcali con soluciones que contenían diferentes relaciones de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ , logrando una resistencia a la compresión de aproximadamente 68 MPa cuando los morteros se curaron a 65 °C durante 3 días.

En este estudio primero se utilizó soluciones de NaOH en diferentes concentraciones, obteniendo el mejor resultado sobre la resistencia a la compresión en concentraciones más altas de NaOH (10 mol kg<sup>-1</sup>), pero debido a la falta de aniones de silicato en la solución de activación las resistencias no eran muy elevadas, en una segunda parte se probó un nuevo conjunto de soluciones alcalinas basadas en una mezcla de silicato de sodio y solución de hidróxido de sodio para aumentar sus propiedades mecánicas. En la Figura 17 podemos observar que se necesitan relaciones mayores de 0,4 en la relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  para obtener mejores resistencias mecánicas.

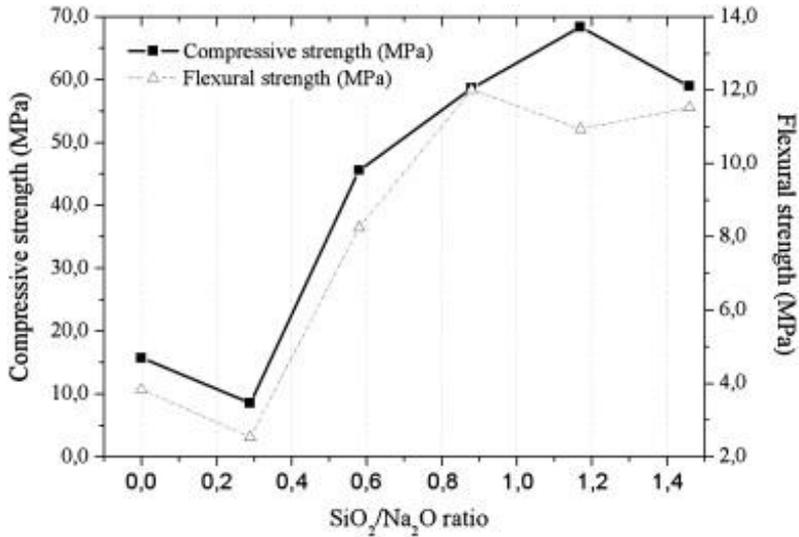


Figura 17 Resistencia mecánica para geopolímeros basados en FCC [56]

Trochez, et al. [57], realizaron un estudio similar al caso anterior utilizando el FCC también como precursor. En las muestras formuladas con relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de 2,4 y  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  de 0,25 obtuvieron resultados en la resistencia a la compresión de hasta 67 MPa, pero en las pastas FCC activadas con una más baja proporción de  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  (0,20), se evidencia una disminución significativa en la resistencia mecánica.

Rodríguez et al. [58], demuestran que las fases principales que participan en la reacción de geopolimerización que incluye el FCC son las fases zeolíticas, que son impulsadas por la conversión del material zeolítico en un gel de tipo aluminosilicato.

El FCC se ha estudiado ampliamente como puzolana en morteros y hormigones con cemento Portland, demostrando que la sustitución parcial del cemento por el FCC, ofrece mayores beneficios sobre la

durabilidad y resistencia [52] [59] [60] [61]. También en sistemas ternarios empleando como segunda puzolana a la ceniza volante (FA), llegando a obtener resistencias entre 103 y 106 MPa a los 90 días de curado [62]. Además como material de sub-base en la construcción de carreteras [63] y bloques de mampostería [64], cuyos resultados demuestran la posibilidad de su utilización sin causar ningún impacto negativo logrando reducir el daño medioambiental.

### **1.7.2 Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)**

La producción de arroz tiene como subproducto la cascarilla de arroz que corresponde aproximadamente al 20 - 22 % en peso de la producción total. Según las previsiones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) la utilización mundial de arroz aumentará en otros 5,2 millones de toneladas en 2018/19 hasta alcanzar los 509,1 millones de toneladas, esto debido al crecimiento de la población y al aumento del consumo mundial de alimentos per cápita de 53,7 kilos en 2017/18 a 53,9 kilos en 2018/19 [65]. En la Figura 18 podemos observar el crecimiento de la producción del arroz a nivel mundial durante estos últimos años.



Figura 18 Producción mundial de arroz [65]

La CCA resulta de la combustión de la cascara de arroz, sus propiedades físico-químicas dependen de la temperatura y del tiempo de calcinación, si se incinera en condiciones controladas puede presentar una gran puzolanicidad [66]. Existe varias investigaciones al respecto, pero en general se reporta que la CCA producida por debajo de 700 °C estaría en forma amorfa y por encima de 800 °C daría lugar a una forma cristalina [67].

Nair et al. [67], estudia las propiedades de la ceniza de cascarilla de arroz producidas en diferentes tipos de hornos para producir una puzolana reactiva con aplicaciones en construcciones de bajo coste para la elaboración de morteros de cal/CCA. En la Figura 19 podemos observar dos gráficas. Se comentan a continuación por separado:

- a) La variación en el contenido de sílice amorfa y la pérdida al fuego debido a los diferentes tipos de hornos utilizados hace que cambie el contenido de la pérdida al fuego y de la sílice soluble. Los

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

autores concluyen que el flujo de aire es un parámetro importante durante la combustión. El contenido mínimo de pérdida al fuego (LOI) corresponde a un horno de laboratorio (CCA-D). El mayor contenido de sílice soluble corresponde a un horno de forma anular (CCA-A) que por su forma peculiar favorece la combustión rápida y el flujo de aire abundante.

- b) La influencia del contenido de sílice en la resistencia a la compresión de diferentes muestras de cal/CCA se representa en la figura b) con su evolución temporal a lo largo del tiempo, en ella se confirma el efecto perjudicial del carbono en la resistencia a la compresión de los morteros.

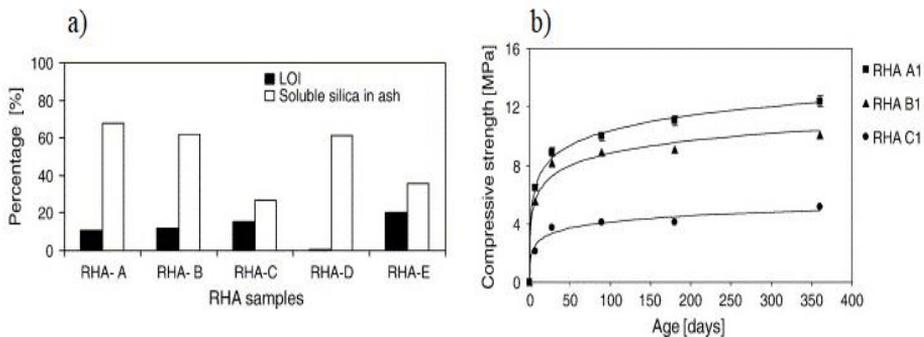


Figura 19 Dónde: a) Contenido de sílice soluble y b) Rc de morteros cal/CCA [67]

Méndez et al. [68], estudiaron la influencia de la relación cal/CCA (1/1, 1/2 y 1/3) sobre la trabajabilidad y la resistencia de los morteros, los resultados demostraron que existe mayor trabajabilidad a medida que aumenta la cantidad de la CCA en la relación cal/CCA.

Los autores llegaron a obtener hasta 18 MPa en la resistencia a la compresión con la relación 1/2 a los 180 días de curado y las resistencias más bajas se obtuvieron con la relación 1/1 para todas las edades de estudio. También se observó un comportamiento similar en las relaciones

cal/CCA al variar la temperatura de 20 a 65 °C, siendo la mejor relación 1/2 en ambos casos. En general, se produce un aumento de la resistencia a la compresión con el tiempo de curado, sin embargo, para la relación cal/CCA de 1/3 no se observa diferencia significativa entre 90 y 180 días de curado. Este hecho puede ser probablemente a un déficit de cal en la mezcla que limita la reacción puzolánica, según indican los autores.

Billong et al. [69], para mejorar las propiedades hidráulicas a largo plazo de los morteros de cal/CCA agregó un 25, 50 y 75 % de metacaolín, los resultados demuestran que el MK contribuyó a mejorar las propiedades mecánicas a largo plazo de los morteros de cal/CCA, reduciendo el contenido de SiO<sub>2</sub> y aumentando los contenidos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, siendo las principales fases formadas los hidratos de silicato de calcio (SCH) y la gelenita (C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>).

En este estudio se formularon 5 dosificaciones de morteros cal/CCA-MK, donde el MK reemplazaba progresivamente a la CCA, los investigadores observaron que a medida que aumentaba la cantidad de MK aumentaba la densidad, este aumento puede explicarse por la densidad absoluta relativamente más alta de MK en comparación con CCA, considerando que la cantidad de cal se mantenía constante en las muestras.

Los morteros con altas cantidades de MK formaron más hidratos y de distinta naturaleza que las muestras con alto contenido de CCA, observando que en la muestra C5 (100 % CCA) solamente se formaba SCH como única fase hidratada. Tras evaluar todos los ensayos experimentales los autores indican que la muestra C4 (25 % MK y 75 % CCA como puzolana) tiene los mejores resultados, tal como se muestra en la Figura 20 donde se muestra la resistencia a la compresión, además

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

la muestra C5 (100 % CCA) tiene una mayor resistencia en edades tempranas de curado.

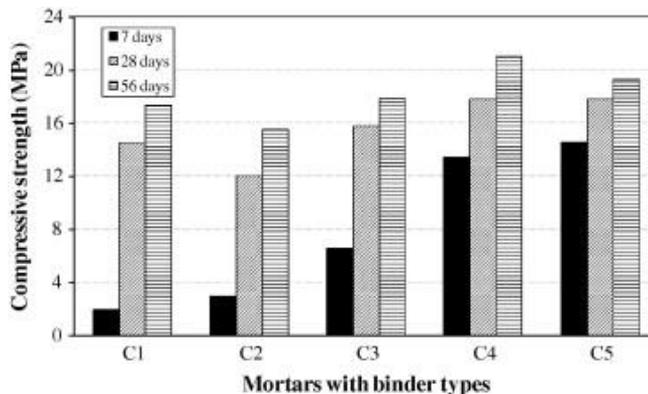


Figura 20 Rc de los morteros cal/CCA-MK [69]

En la Figura 21 podemos observar el porcentaje de absorción de agua, las muestras que contenían 0 y 25 % de CCA (C1 y C2) mostraron una disminución gradual de la absorción de agua con el tiempo de curado, pero en las muestras que contenían 50 – 100 % de CCA (C3-C5), la absorción de agua aumentó ligeramente a los 56 días, este aumento en la absorción de agua podría explicarse por la presencia de cenizas sin reaccionar en la muestra que debido a su estructura celular absorbe más agua [69].

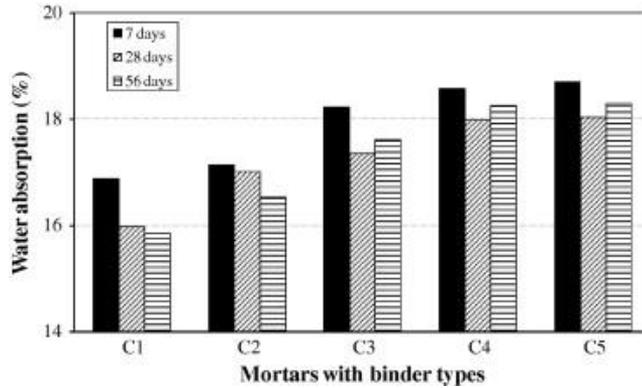


Figura 21 Porcentaje de absorción de agua de los morteros cal/CCA-MK [69]

Pavía et al. [70], estudian el efecto de la CCA en las propiedades de los morteros de cal hidratada (CL90) con el fin de mejorar sus propiedades. Los resultados demuestran que el reemplazo de CCA por la cal mejora la trabajabilidad de los morteros, disminuye la relación agua/conglomerante y la cantidad de agua requerida para alcanzar una consistencia específica, también mejora la densidad aparente y reduce la diferencia entre las densidades real y aparente, por lo que resulta un mortero con una menor porosidad.

También la incorporación de CCA mejora la resistencia mecánica, así a medida que se aumenta el porcentaje de reemplazo tal y como aparece en la Figura 22 podemos observar que con un mayor contenido de CCA se acelera el tiempo de fraguado respecto del mortero control. Aproximadamente el tiempo de fraguado es 2,5 veces más rápido que el mortero de cal sin puzolana.

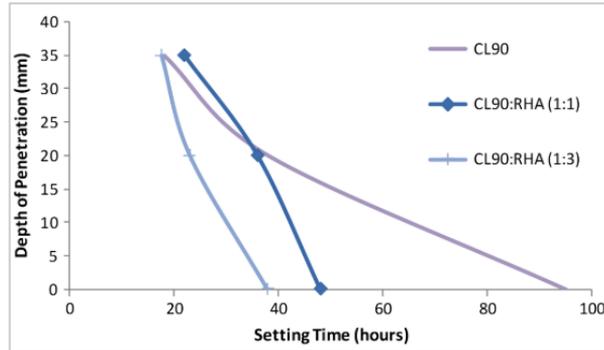


Figura 22 Tiempo de fraguado de una pasta mixta de cal/CCA [70]

Los resultados también evidenciaron que al aumentar la cantidad de CCA en los morteros de cal se mejora el módulo de elasticidad, es decir que se vuelven más rígidos y elásticos, pero al momento de su rotura permanecen plásticos por lo que sufren una tensión significativa antes de fallar.

Pavía y Aly [71], estudiaron remplazar cantidades crecientes de agregados de 1:1 a 1:3 en volumen utilizando 2 tipos de agregado uno de origen silicio y el otro de origen calcáreo en morteros de cal y también con materiales cementosos suplementarios siendo estos: morteros de cal/CCA y cal/escoria granulada de alto horno (GGBS), en ambos casos, solo con arena de origen silicio y una relación binder/agregado de 1/3 en peso.

En este estudio se observó que al tener mayor cantidad de agregado se disminuye la resistencia a medida que proliferan las zonas de interfase agregado-conglomerante, además aumenta la demanda de agua en la relación agua/conglomerante, siendo los morteros con el agregado de caliza un 20 % más fuertes que los morteros de sílice en edades largas de curado. Los morteros con GGBS tienen mayores resistencias que los

morteros de CCA llegando a alcanzar 6 veces más de la resistencia a compresión de un mortero control con solo cal. Las propiedades de GGBS y la CCA que rigen la producción de los hidratos y la cinética de la reacción puzolánica se consideran parcialmente responsables de la variación de las propiedades de los morteros estudiados.

Respecto a la absorción de agua por capilaridad con el aumento del agregado en los morteros esta disminuye. Por otro lado, al aumentar el porcentaje de sustitución de la cal por las puzolanas (CCA y GGBS) de 10 a 30 % se aumenta las resistencias mecánicas.

Dentro del estudio sobre el comportamiento de 9 puzolanas en una matriz cal/puzolana descrita por Pavía y Walker [72] se encuentran entre las puzolanas seleccionadas a la CCA y META (arcilla calcinada) donde la relación cal/puzolana es de 1/1 y de 1/3 respectivamente. En lo referente al estudio de la demanda de agua, se indica que la superficie específica del material es el parámetro más influyente frente a otros como el tamaño de partícula o de la relación cal/puzolana. Se ha comprobado que existe una relación lineal donde a mayor área superficial mayor cantidad de agua se necesita, tal y como se observa en la Figura 23. Si bien al aumentar la sustitución de la cal por puzolana se reduce la cantidad de agua, esta relación no se cumple con el META, debido a su pequeño tamaño de partícula y su elevada superficie específica. También se concluye que todas las mezclas realizadas con las puzolanas estudiadas reducen el tiempo de fraguado respecto de la mezcla que contiene únicamente cal.

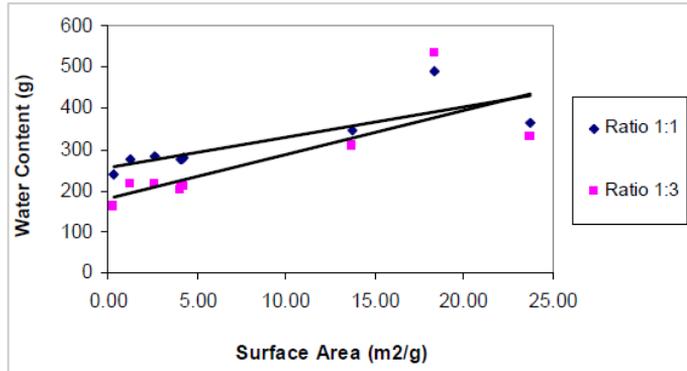


Figura 23 Influencia de la superficie específica y el ratio cal: puzolana sobre la demanda de agua [72]

Bouzón et al. [38], obtuvieron activadores alcalinos por reflujo de mezclas acuosas de CCA y NaOH. Las mezclas activadas con dicha mezcla y usando como precursor el residuo del catalizador de craqueo catalítico (FCC) y como activador alcalino un silicato alternativo a partir de la CCA mezclada con NaOH, permitieron obtener morteros con unos valores de resistencia a la compresión que variaban desde 31 a 41 MPa curados a 65 °C durante 1 día. Estas resistencias eran muy similares a las de un mortero preparado con silicato sódico comercial y NaOH.

En este estudio se utilizaron la CCA sin moler (O-CCA) y molida (G-CCA), en la Figura 24 podemos observar que un mortero control elaborado con silicato sódico comercial y NaOH tiene una resistencia a la compresión de 41 MPa y los morteros que tienen activadores alcalinos con CCA (original y molida) presentan resistencias similares, siendo los tiempos de reflujo ensayados entre 30 y 240 minutos los óptimos.

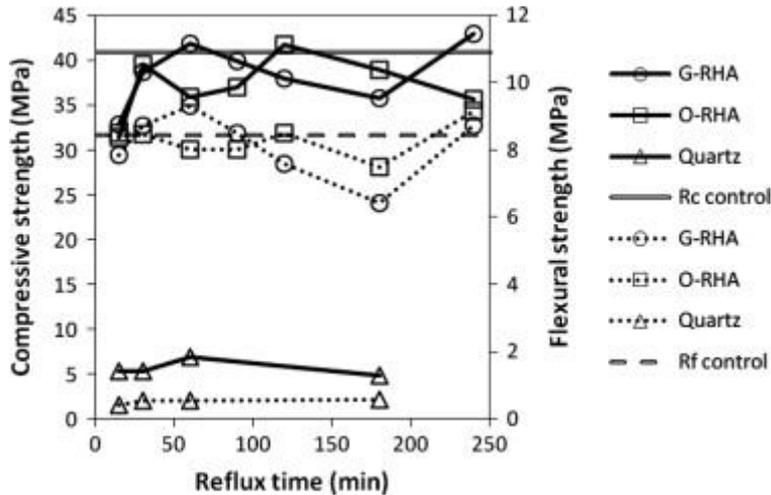


Figura 24 Influencia del tiempo de reflujo en la resistencia de los morteros [38]

Kamseu et al. [73] para obtener silicato sódico alternativo al comercial realizaron una mezcla de la CCA con distintas molaridades de NaOH (8, 10 y 12 M), el objetivo era investigar cual es la disolución óptima para la formación de oligómeros de sílice capaces de actuar como activador durante la geopolimerización en compuestos a base de metacaolín.

Los resultados (FTIR y XRD) mostraron que las soluciones de silicato alternativo formado por la mezcla CCA-NaOH tienen características similares a las del silicato de sodio comercial, siendo la combinación del 25 % del silicato sódico comercial con el 75 % de la solución del silicato de sodio a partir de CCA-NaOH en volumen, el que conduce a una buena policondensación, densificación, alta resistencia a la flexión (~8 MPa) y baja porosidad. En la Figura 25 podemos observar el porcentaje de absorción de agua de los geopolímeros basados en metacaolín en función del contenido de la solución de silicato de sodio a partir de CCA-NaOH, donde las muestras con el 100 % de CCA-NaOH presentan valores relativamente altos de absorción de agua.

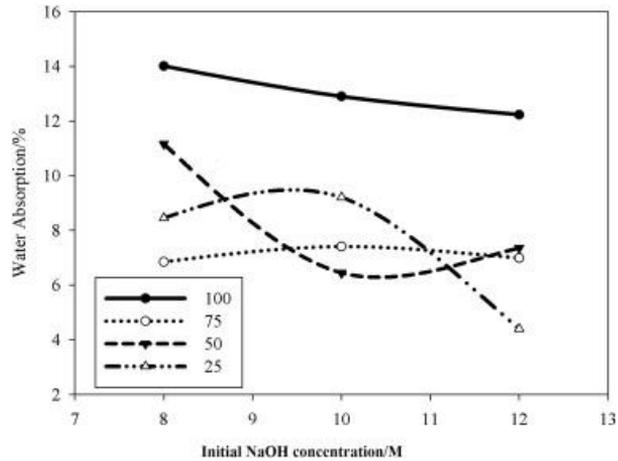


Figura 25 Porcentaje de absorción de agua en función del contenido de silicato sódico alternativo [73]

Tong et al. [74] realizaron un estudio similar al caso anterior donde utilizan la CCA para la producción de silicato de sodio alternativo para activar cenizas volantes y escoria granulada de alto horno. Los resultados demostraron que la solución de silicato obtenido de la ceniza de cáscara de arroz fue tan eficiente como el silicato comercial, llegando a obtener resistencias a la compresión del rango de 60 MPa a los 28 días de curado, igualando la resistencia obtenida de las muestras de control producidas con activadores disponibles comercialmente.

También Mejía et al. [39] han utilizado la CCA como un reemplazo total para el silicato de sodio comercial en mezclas de geopolímero. Dichos autores prepararon pastas de ceniza volante (FA), de escoria de alto horno (GBFS) y un sistema binario 50FA:50GBFS, que fueron activadas por una mezcla de silicato de sodio comercial e hidróxido de sodio, y por dos tipos de CCA mezcladas con NaOH. En este estudio se ratifica que tanto la sílice amorfa como parte de la sílice cristalina presente en la ceniza de

cascara de arroz tienen la posibilidad de participar en el proceso de activación alcalina, siempre y cuando las condiciones de alcalinidad estén adecuadamente bien ajustadas, llegando a obtener resistencias mecánicas del orden de 42 MPa a 7 días de curado

Hwang y Huynh [75] estudiaron mezclas de cenizas volantes de clase F (FA) y ceniza de cascarilla de arroz (CCA) con una solución alcalina para producir geopolímeros, la solución de activador alcalino fue NaOH en concentraciones 8, 10, 12 y 14 M y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Los resultados demostraron que las muestras preparadas con una concentración de NaOH de 10 M y un contenido de CCA del 35 % tiene la mayor resistencia a la compresión; y que el aumento de la concentración de NaOH y del contenido de CCA más allá de estos valores exhibió una menor resistencia a la compresión. El análisis químico mostró que las principales fases cristalinas presentadas en el geopolímero resultante fueron cuarzo, mullita y cristobalita. Además, se detectaron fases menores de zeolita en todas las muestras de geopolímero.

Geraldo et al. [76] utilizaron la CCA y baldosas de cerámica roja molida para producir morteros geopoliméricos sin utilizar silicato de sodio comercial, y usan como activador alcalino una solución de NaOH a distintas molaridades (7, 9 M). La resistencia a la compresión del material resultante se desarrolló muy rápido, alcanzando un valor de 11 MPa después de un día de curado y 22 MPa después de 90 días. El mismo autor también utiliza el lodo de tratamiento de agua (WTS) no calcinado como reemplazo parcial de metacaolín (MK), como disolución activadora emplea una mezcla de NaOH y ceniza de cascarilla de arroz. El reemplazo

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

del 15 % de MK por WTS tuvo una resistencia a la compresión de 25 MPa a los 28 días, lo que demuestra que el uso de WTS no calcinada y una solución de silicato de sodio sintetizada a partir de la CCA en geopolímero es técnicamente factible, lo que resulta en una alternativa más sostenible y más amigable medioambientalmente para la eliminación de WTS y CCA [77].

Recientemente Font et al. [78] han propuesto el uso de una mezcla ternaria de CCA, ceniza de hueso de oliva y escoria de alto horno obteniendo morteros ternarios activados con resistencias a la compresión dentro el rango de 40 - 70 MPa, estos morteros se pueden considerar 100 % ecológicos ya que no utilizan ningún reactivo comercial.

Finalmente, varios son los investigadores que han estudiado la influencia de la CCA en morteros y hormigones con cemento Portland, con resultados que demuestran mejoras en alguna de las características del objeto de estudio respecto del mortero control [79] [80][81][82]. También se han realizado investigaciones en hormigón de alto rendimiento [83], en morteros y hormigones con fibras de nylon [84][85] y en hormigones autocompactantes [86] [87].

En resumen, la CCA ha sido objeto de un amplísimo número de investigaciones y su utilización reporta varios beneficios económicos, ecológicos y tecnológicos. Varias son las ventajas de la CCA que pueden proporcionar un nuevo impulso para el desarrollo sostenible local o más regional en el futuro [88].

### 1.7.3 Ceniza de lodo de depuradora (CLD)

La manipulación y eliminación de lodos producidos en plantas de tratamiento de agua plantea dificultades a los científicos e ingenieros ambientales. Su gestión y eliminación requiere de una cuidadosa consideración debido a su posible toxicidad para el medio ambiente. Existen opciones de reutilización como, adsorbente para contaminantes y metales pesados; compostaje; como sustrato en humedales construidos; en el acondicionamiento y deshidratación de lodos de depuradora; en la producción de cemento sustituyendo la parte de la materia prima; en la fabricación de ladrillos y cerámica; en la fabricación de agregados livianos artificiales; como material cementoso y sustituto de arena en la preparación de hormigón y mortero. Sin embargo, las propiedades del lodo para el tratamiento del agua en su mayoría dependen de las composiciones químicas del mismo y estas son importantes a la hora de decidir su posible reutilización [89].

En la Unión Europea la legislación que exige la gestión de lodos para que cumpla con los requisitos de reciclaje eficiente de recursos sin contaminar el medio ambiente con sustancias nocivas es la Directiva 91/271/CEE. En el año 2016 los residuos totales generados en la UE por la totalidad de actividades económicas y hogares ascendieron a 2538 millones de toneladas siendo el 10 % correspondiente a los servicios de agua y residuos [90].

La incineración de lodos es una opción de gestión potencial para lodos de depuradora debido a que este proceso reduce la masa en aproximadamente un 70 % y el volumen en un 90 %, obteniéndose tras su calcinación la ceniza de lodo de depuradora (CLD) [91]. Esta ceniza

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

se trata de un material en polvo que contiene altos porcentajes de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{SO}_3$ , y ha mostrado reactividad moderada en términos de puzolanicidad. Dicho carácter puzolánico lo hace viable como material de reemplazo del cemento en mortero y hormigones, o en nuevos conglomerantes activados con álcali [92], además, en este proceso de combustión se destruye los componentes orgánicos peligrosos en el lodo y se minimiza los problemas de olor [93].

Los lodos generados a partir de plantas de tratamiento de aguas y aguas residuales comprenden minerales, como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y  $\text{CaO}$ , con propiedades similares a las materias primas en la producción de materiales de construcción [94] [95]. El contenido amorfo de CLD varía de 35 a 75 % dependiendo de la composición y el tipo de tratamiento térmico al lodo de depuradora [95]. Cuando a la CLD se le somete a un proceso de molienda aumenta su trabajabilidad al aumentar su finura, mejorar la actividad puzolánica, por lo que también se mejora las resistencias mecánicas de los morteros [96].

A continuación, describimos el proceso del pretratamiento de lodos residuales:

- a) **Engrosamiento de lodos**, proceso donde se elimina una porción de la fracción de agua para reducir el volumen y aumentar su contenido sólido, en este espesamiento de lodos se puede realizar mediante asentamiento por gravedad y por flotación por aire disuelto.
- b) **Acondicionamiento y deshidratación de lodos**, en el acondicionado se aplica diferentes tipos de productos químicos (cal,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , etc.) para neutralizar sustancias peligrosas y luego

pasa a la deshidratación donde puede alcanzar alrededor del 25 - 30 % del contenido de sólido seco. Este proceso se puede operar mediante filtros de vacío o por prensas de filtro.

- c) **Secado de lodos**, proceso que consiste en reducir significativamente el volumen y lograr oxidar la mayor cantidad de materia orgánica. Un lodo seco contiene el 90 % o más del contenido sólido y el equipo empleado en este proceso puede ser: sistemas de secado de banda (150 °C), lecho fluidizado (90 °C) y el sistema tambor (300 °C).
- d) **Incineración de lodos**, proceso que sirve para destruir patógenos específicos y oxidar en gran medida la materia orgánica. La ceniza de fondo obtenida de la incineración de lodo es solo el 10 % del volumen original de lodo y contiene 99 % o más del contenido sólido, 0 - 3% de materia orgánica. Los tipos comunes de incineradores son: el horno de hogar múltiple, horno de lecho fluidizado y el horno eléctrico de infrarrojos [94].

Sin embargo, también es importante considerar la temperatura de calcinación para lograr mejores propiedades puzolánicas. Vouk et al. [97] utilizaron un lodo deshidratado y estabilizado de 4 meses de edad para estudiar la influencia de diferentes tipos de temperatura de combustión (800, 900 y 1000 °C), posteriormente sustituyeron hasta un 30 % de cemento por esta CLD para fabricar morteros. Los resultados demostraron que la influencia de la temperatura de calcinación no afecta a las propiedades del mortero fresco, pero si afecta en el estado endurecido con respecto a las propiedades mecánicas, siendo la temperatura de combustión más favorable 900 °C. Además, a medida que

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

la temperatura de combustión aumentaba la reducción de la masa del lodo aumentaba aproximadamente un 2 % por cada 100 °C. Mediante difracción de rayos X se observó la presencia significativa de una fase amorfa y de muchos minerales cristalinos, los principales fueron el cuarzo, cristobalita, moscovita, anhidrita y calcita, pero este último al aumentar la temperatura de combustión a 1000 °C había desaparecido casi por completo.

Por otro lado, el estudio de Azevedo et al. [98] evaluó la actividad puzolánica de las cenizas de lodos de depuradora como material cementante suplementario, la calcinación de las CLD fueron dentro el rango de temperatura de 600 a 900 °C. La reacción puzolánica se controló mediante una prueba de medición de conductividad eléctrica, que demostró que la disminución de la conductividad de una suspensión insaturada de puzolana/hidróxido de calcio se correlaciona con el consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  durante 1000 segundos. Siendo la calcinación de lodos de depuradora a 600 °C la más adecuada para su uso como puzolana, ya que obtuvo una mayor pérdida de conductividad (88,3 %) y consumió menos energía durante el proceso de incineración. También se observó una correspondencia entre la prueba de resistencia a la compresión del mortero y la prueba de conductividad, y ambas indicaron que la puzolanicidad disminuye al aumentar la temperatura.

Zhou et al. [99] estudiaron la adición de 10, 20 y 30 % en peso tanto de cal hidratada como de cemento Portland ordinario para activar la CLD con una relación agua/conglomerante de 0,38. Las probetas fueron curadas en cámara húmeda con  $90 \pm 5$  % HR a una temperatura de  $23 \pm 2$

°C para diferentes períodos de tiempo (7, 28 y 90 días) antes de las pruebas.

Los resultados demuestran que la mezcla control (solo CLD) no se hidrataba en contacto con el agua ni producía calor por sí misma, pero al añadir cemento se acelera la cantidad de calor de hidratación respecto a la hidratación de las CLD únicamente, y que las pastas de cal/CLD mostraron mayores cantidades de calor de hidratación y mayor reactividad que las pastas de cemento/CLD, esto podría ser debido a la hidratación exotérmica de la cal.

El análisis de las fases cristalinas primarias de la CLD original mostraron la presencia de cuarzo, hematita, leucita, magnetita y anortoclasa, pero luego de activarlas con cal aparte de las fases cristalinas originales en la CLD, hubo nuevas fases cristalinas producto de la reacción de hidratación de la CLD y la cal. Estas nuevas fases incluyen a la brushita y calcita. Sin embargo, no se detectó brushita en las pastas cemento/CLD. Las fases cristalinas responsables del desarrollo de la resistencia en el sistema a base de cal/CLD fueron principalmente hidratos de fosfito de calcio y brushita. En la Figura 26 podemos observar la resistencia a la compresión de las pastas en:

- (a) cemento/CLD donde la resistencia aumentó gradualmente con el aumento de la edad de curado y el contenido de cemento. Esto se atribuyó principalmente a la hidratación de PC y a la reacción puzolánica entre la portlandita formada a partir de la hidratación de PC y la CLD.
- (b) cal/CLD donde las muestras con las proporciones más altas de cal producen mezclas con mayores resistencias al tener más cantidad de cal para que se produzca la reacción puzolánica.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

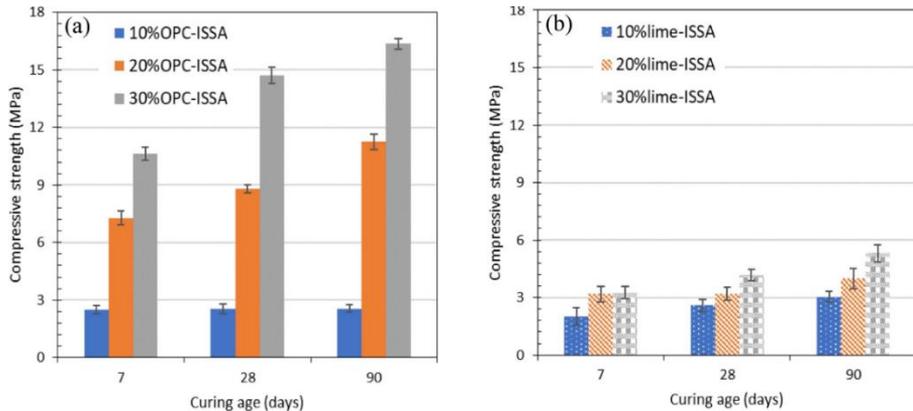


Figura 26 Rc de las pastas: a) PC/CLD y b) cal/CLD [99]

El mismo autor Zhou et al. [100] utiliza 2 tipos de cal (viva e hidratada) incorporadas a un sistema de ceniza de lodos de depuradora finamente molida (FSSA) y cenizas volantes (FA) para desarrollar un nuevo tipo de sistema de cal y puzolana y estudiar los efectos de estos dos tipos de cal sobre las propiedades mecánicas en estos sistemas.

En la Figura 27 se muestra los resultados de los espectros de difracción de rayos X para los 28 y 90 días de curado en las pastas con el 30 % de cal viva (a) y el 30 % de cal hidratada (b) preparadas con FSSA. Las fases originales de la FSSA fueron: anortoclasa (Ac), la hematita (H) y la leucita (L), pero al incluir la cal se formaron las siguientes fases: fosfato de calcio hidratado (CHP); Brushita (B); Calcita (C); Portlandita (P); Ct: Clinotobermorita (Ct) entre otras.

En lo referente a la resistencia a la compresión las pastas cal-FSSA obtuvieron mejores resistencias que las pastas cal-FA, pero al usar la cal viva se observaron ligeras expansiones debido a reacciones exotérmicas de hidratación de la cal que podrían causar algunas micro grietas en la matriz de la pasta que pueden reducir la resistencia en el sistema.

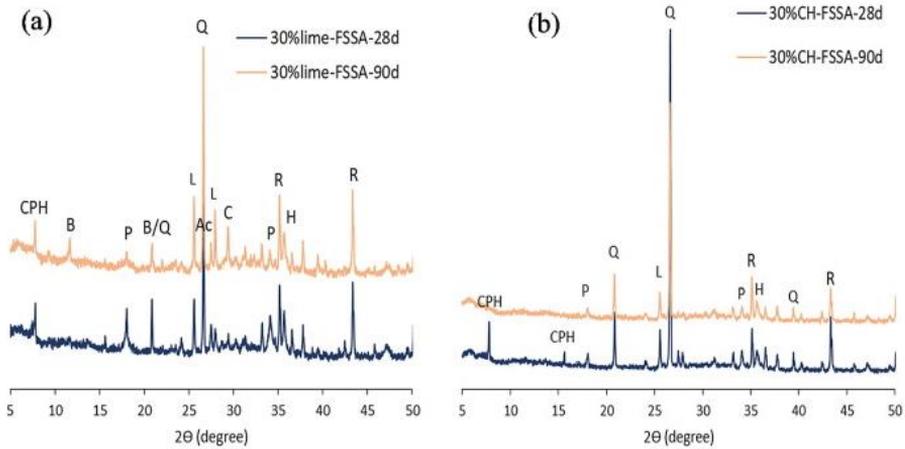


Figura 27 Espectros XRD de 30 % (a) pastas de cal viva (b) cal hidratada [100]

Existe información muy limitada sobre la aplicación de la ceniza de lodo de depuradora en morteros cal, pero el Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción (GIQUIMA) en el cual se enmarca la presente tesis, junto al Instituto de Ingeniería Energética (IIE), han trabajado en el diseño de sistemas óptimos de combustión para residuos agrícolas y así poder elaborar materiales de construcción no convencionales con aplicación en países en desarrollo. En este estudio [101], se emplearon 3 tipos de puzolanas que corresponden al catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC), ceniza de cascara de arroz (CCA) y ceniza de lodo de depuradora (CLD), cuyos resultados y experiencias sirvieron como base de partida para la tesis. En la Figura 28 podemos observar la resistencia a la compresión a los 28 días de curado de las 3 puzolanas utilizadas con diferentes relaciones cal/puzolana.

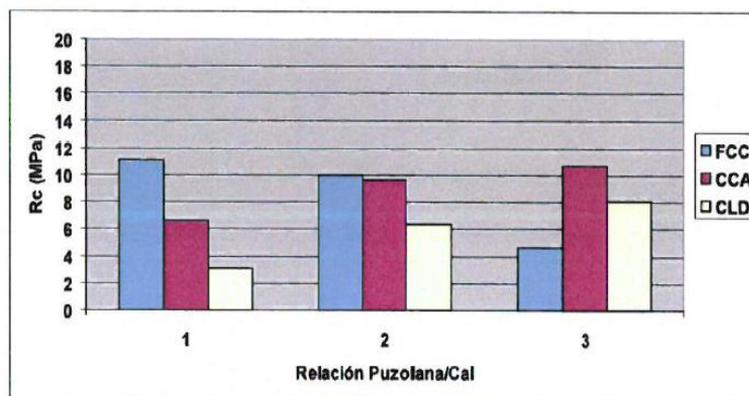


Figura 28 Resistencia a la compresión de morteros de cal/puzolana [101]

En cambio, existe una bibliografía amplia del estudio de la CLD para fabricación de cemento o como material cementicio suplementario para el reemplazo parcial del cemento Portland en morteros y hormigones [102] [103], en la fabricación de bloques de hormigón [104][105], de ladrillos cerámicos [106] y en la estabilización de suelos [107], así como en otras aplicaciones.

Estudios recientes también han utilizado la CLD junto a otras puzolanas para la activación alcalina. Uno de estos estudios es el desarrollado por Tashima et al. [108] que utilizaron de 0 a 30 % de la CLD para sustituir escorias granuladas de alto horno molidas (GGBS) en la producción de pastas y morteros activados con álcalis que se curaron a 20 °C. Los mejores resultados se obtuvieron en las muestras mezcladas con 20 % en peso de CLD activado con 6 mol kg<sup>-1</sup> de NaOH, las cuales contenían las mayores cantidades del gel (N, C)ASH, llegando a producir morteros con resistencias a la compresión cercanas a 30 MPa después de 28 días de curado a temperatura ambiente.

Un estudio similar llevado por Chen et al. [109] con la CLD y la GGBS activadas con soluciones alcalina de hidróxido de sodio y silicato de sodio en diferentes relaciones molares, también revelaron que el producto de reacción principal de la mezcla óptima del geopolímero era el gel de tipo (N, C)ASH con sustituciones de Fe, llegando a alcanzar una resistencia de 32,8 MPa a los 28 días de curado.

Finalmente, las cenizas de lodo de depuradora tienen un potencial para diferentes aplicaciones relacionadas con el hormigón publicadas desde 1983 y pueden ser utilizados para elaborar materiales no estructurales [91], correspondiendo al propósito de nuestra investigación.

### **1.7.4 Tierra de diatomea (TD)**

La diatomita o tierra de diatomeas (TD) es un mineral en polvo no metálico compuesto de restos esqueléticos fosilizados de plantas acuáticas microscópicas de una sola célula llamadas diatomeas [110] o también son algas microscópicas ( $\sim 1\text{--}500\ \mu\text{m}$  de longitud) unicelulares que poseen paredes celulares rígidas (frústulas) compuestas de sílice amorfa. La TD se clasifica como una puzolana natural que, dependiendo de la especie de diatomea y las condiciones de su crecimiento estas frústulas pueden tener una amplia gama de morfologías diferentes. Actualmente se estima que hay más de 100000 especies diferentes, clasificadas por sus morfologías únicas de frustulas. En la Figura 29 se puede observar la clasificación de manera general de la diatomea según su morfología: **a)** la forma pennate (la sección expandida muestra parte del tronco, que detalla el rafe central, las costas y las estrías), **b)** la forma

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

céntrica, **c**) Diagrama esquemático de una diatomea céntrica que muestra la naturaleza parecida a una placa de Petri del tronco, **d**) Las repeticiones sucesivas que involucran la hipoválvula conducen a una reducción de tamaño, **e**) Mecanismo propuesto de morfogénesis de diatomeas: tras la replicación de diatomeas, se forma una vesícula de deposición de sílice (SDV) [111].

La diatomita ha encontrado una amplia gama de aplicaciones comerciales, que incluyen usos como la filtración, el aislamiento, la absorción o la elaboración de materiales de construcción entre otros, y tiene gran potencial para la micro, nanobioteconología.

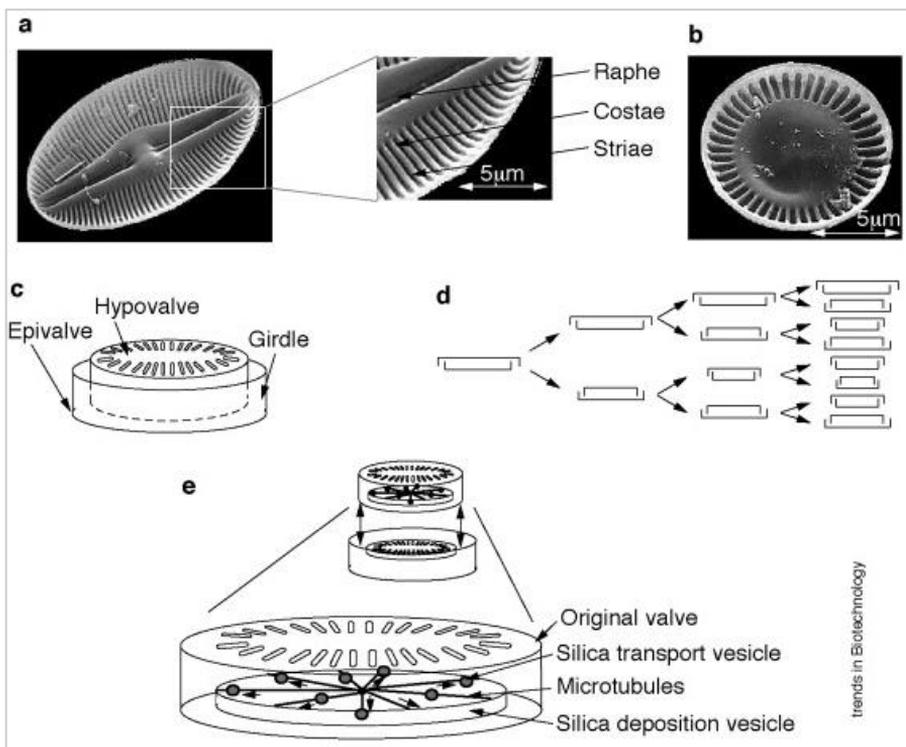


Figura 29 Clasificación de la morfología de diatomeas [111]

Sierra et al [112] estudiaron 3 tipos de TD (de agua dulce y agua marina) para elaborar pastas con cal viva curados a temperatura ambiente. Según las observaciones la fase de cementación está asociada con la reacción puzolánica de los esqueletos de diatomeas con la cal, y se identificó como gel principal el silicato de calcio hidratado (SCH).

Pimraksa et al. [113] usaron una TD original y una TD calcinada para fabricar ladrillos livianos (3,5 cm × 7,5cm × 15,0cm) con mezclas de cal hidratada y yeso. Estudiaron la demanda de agua con el 45, 50, 55 y 60 % del contenido de agua en la pasta de TD/cal en una proporción de 85/15.

Los resultados demostraron que a mayor cantidad de agua se obtenían menores resistencias a la compresión, y cuando tiene un mayor contenido de cal se aumenta la densidad aparente y la resistencia a la compresión. En referencia a la calcinación de la TD está contribuye a una reacción puzolánica adicional debido a la deshidroxilación de los minerales arcillosos mejorando las propiedades mecánicas y térmicas del ladrillo liviano.

Tavares et al. [110] estudiaron la tierra diatomea calcinada y no calcinada en morteros de cal hidráulica y su capacidad para retener el agua como barrera de impermeabilización, la dosificación volumétrica de los morteros fue 1:3 y 1:2 (cal:agregado), a lo que se añadió 5 % de diatomita en términos del volumen total. En la Figura 30 podemos observar el comportamiento capilar para a) mortero control, b) mortero con TD no calcinada y c) mortero con TD calcinada, comparando todas las dosificaciones de los morteros con cal-TD, es el mortero control quien

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

presenta un período más largo de barrera de impermeabilización, seguida por el mortero de TD sin calcinar y finalmente el mortero de TD calcinada, por lo tanto, calcinar la TD no tiene ningún efecto positivo como barrera frente a la humedad.

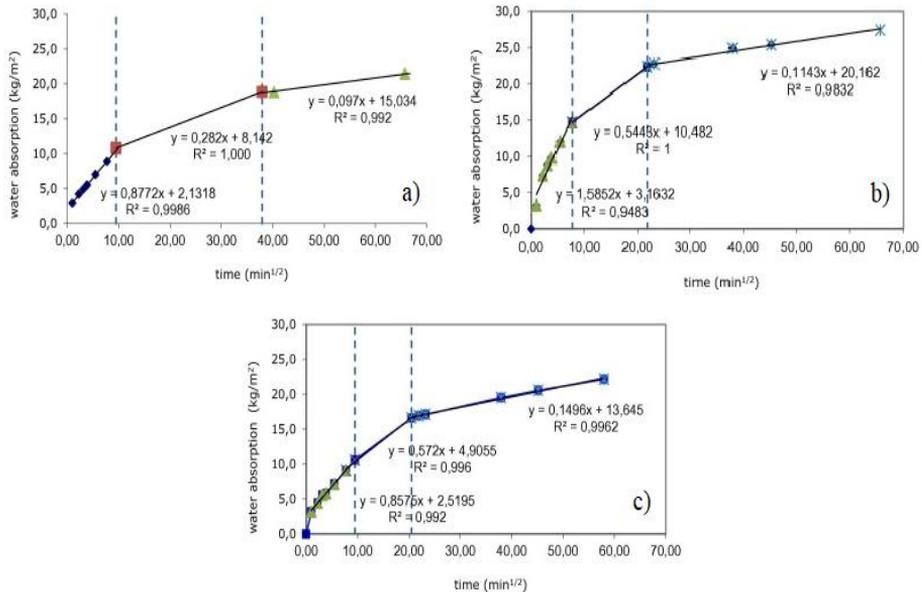


Figura 30 Absorción de agua por capilaridad de los morteros cal y TD [110]

En la tesina de máster de Ricardo Carranza [114] se presenta un estudio de reactividad puzolánica empleando el ensayo de medida de pH y conductividad de 3 tierras diatomeas de diferente origen en muestras saturadas de cal. Entre las diatomeas empleadas se encontraba la tierra de diatomea procedente de Guatemala que también se utilizara en este trabajo.

Para realizar este ensayo elabora proporciones de cal/puzolana de: 1/9; 2/8; 3/7; 4/6 y 5/5 siendo el total de la masa sólida corresponde a 1 g. Los resultados obtenidos en las pruebas de conductividad y pH demuestran

que la tierra de diatomea de Guatemala presenta una alta reactividad, obteniendo pérdidas de conductividad por encima del 90 % en las relaciones acuosas de 1/9 y 2/8 y cercanas al 60 % en las relaciones más ricas en hidróxido cálcico (4/6 y 5/5).

Li et al. [115] también estudiaron la tierra diatomea y la ceniza volante (FA), pero como reemplazo de cemento Portland (PC) de hasta un 60 % en peso para la fabricación de morteros. Los resultados demostraron que al emplear la tierra diatomea y FA se reduce ligeramente la demanda de agua y también se reduce el tiempo de fraguado inicial y final de los sistemas (PC-TD, PC-FA) cuando existe altos niveles de reemplazo. En la Figura 31 podemos observar la resistencia a la compresión, donde a un 1 día de curado todas las dosificaciones mixtas tienen una resistencia menor que el mortero control debido a su bajo contenido de cemento y bajo grado de hidratación, pero a los 7 días de curado solo las mezclas con un nivel de reemplazo del 15 % y 30 % de TD o de FA exhibieron una resistencia comparable al mortero de referencia debido al desarrollo de la reacción puzolánica de TD y FA.

El mismo investigador elabora hormigones reemplazando hasta un 40 % de cemento por diatomita y caliza, los resultados demostraron que las mezclas que contienen TD tiene un mejor desarrollo de resistencia con propiedades tempranas adecuadas para aplicaciones generales y cuando llega a los 28 días de curado la resistencia del hormigón se incrementa en un 40 % con el uso de diatomita [116].

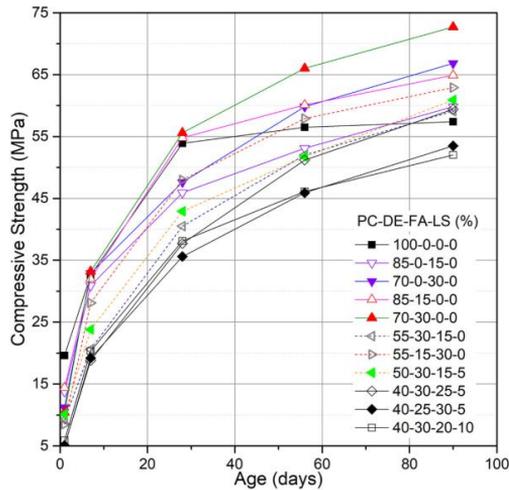


Figura 31 Rc de los morteros PC-TD-FA-cal [115]

Debido a su alto contenido en sílice, la TD puede ser una excelente fuente de sílice como se ha demostrado que lo es la CCA para preparar silicatos alternativos. Font et al. [117] estudiaron 3 tipos de tierra de diatomea para la producción de activadores alcalinos. Las diatomeas del estudio fueron: diatomita comercial (CD), una diatomita residual de la industria cervecera (BD), TD de la industria del vino (WD), TD la industria del vino calcinada (WCD), todas ellas se emplearon junto con el hidróxido de sodio para activar FCC y su desempeño fue comparado con las mezclas obtenidas a partir del silicato sódico comercial (CW) y de ceniza de cascara de arroz.

Mediante DRX observaron que las principales fases cristalinas en todas las diatomitas eran cuarzo y cristobalita, también se identificaron cantidades menores de otras fases cristalinas, incluyendo tridimita, anortita y calcita.

En la Figura 32 podemos observar la resistencia a la compresión de estas TD utilizadas, en donde después de los morteros de referencia (CW,

CCA), la tierra diatomea comercial (CD) y la tierra diatomea residual de cerveza (BD) tienen mejores resistencias que las muestras de tierras de diatomea de la industria vinícola.

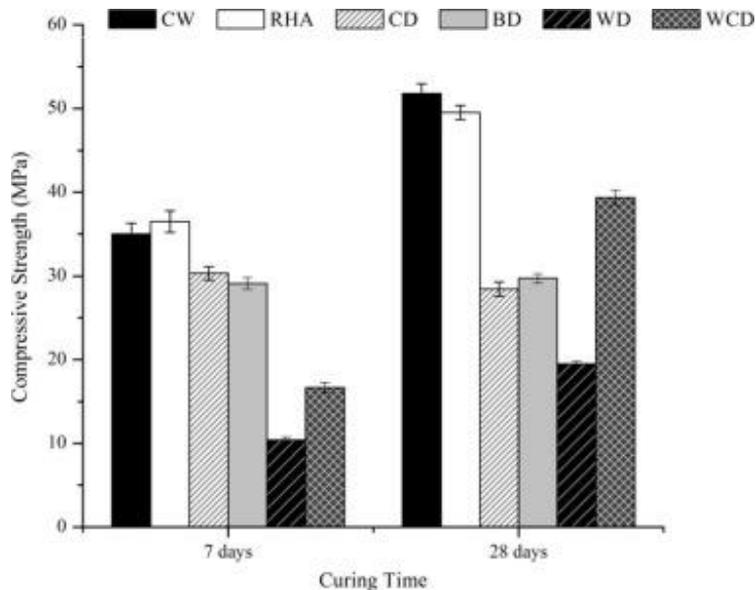


Figura 32 Rc de morteros con los 4 tipos de diatomea [117]

Mejía et al. [118] estudiaron 3 fuentes de sílice las cuales fueron: la ceniza de cascarilla de arroz (RN), la tierra de diatomea gastada (DN) y el silicato de sodio comercial (SN).

Estas fuentes de sílice se mezclaron con una solución de hidróxido de sodio y agua para activar un sistema binario de ceniza volante/metacaolín (FA/MK), siendo la relación de ambos un 70/30 en peso. Los resultados mostraron que la fuente de sílice a partir de tierra diatomea (FA/MK-DN) retrasa el tiempo inicial de fraguado hasta 80 minutos tal como se observa en la Figura 33-a, y además tiene un mejor comportamiento a la compresión respecto de la fuente de sílice de ceniza de cascara de arroz tal como podemos observar en la Figura 33-b para todas las edades de

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

curado, si bien hay que indicar que la relación agua/binder es distinta para el mortero control respecto a los que están fabricados con silicatos alternativos que emplean una mayor cantidad de agua en su amasado.

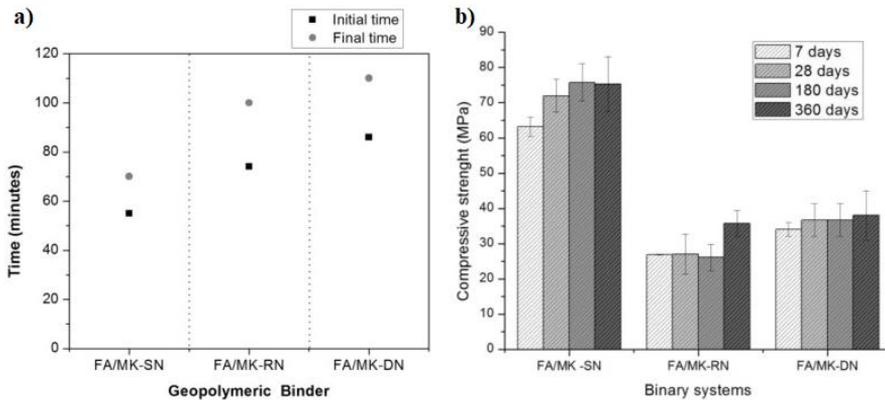


Figura 33 a) tiempo inicial de fraguado y b) Rc de los diferentes sistemas [118]

Sinsiri et al. [119] estudiaron la TD como reemplazo desde 0, 60, 80 y 100 % por la ceniza volante (FA) para elaborar morteros utilizando soluciones de silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) e hidróxido de sodio (NaOH) como activadores. La concentración de NaOH fue de 15 M y las relaciones de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  de 1,5 en peso, y la relación líquido alcalino/conglomerante de: 0,40 - 0,50 - 0,60 y 0,70 en peso.

Las probetas fueron curadas a 75 °C durante 24 horas, los resultados demostraron que el reemplazo de la TD por parte de FA mejora la trabajabilidad y la capacidad de deformación de los morteros, siendo la mejor relación líquido alcalino/conglomerante de 0,50 y el 60 % de sustitución de la TD por FA porque mayores sustituciones reducían la resistencia a la compresión.

Arbi et al.[120] estudiaron la TD y la escoria de alto horno para elaborar nuevos materiales mediante activación alcalina en presencia de aluminio

reactivo procedente de cemento de aluminato de calcio (CAC), en este estudio se prepararon dos mezclas, la primera contenía 20 % de CAC y 80 % de escoria y la segunda 20 % de CAC y 80 % de diatomita, ambas mezclas se activaron con sulfato de sodio o con una solución de hidróxido de sodio.

La mayor reactividad de la escoria y la diatomita a pH alto favoreció su interacción con el CAC. Los productos de reacción principales son geles de tipo CASH o (N, C)ASH, los cuales dependían de los materiales primarios y el activador utilizado.

Finalmente, la tierra de diatomea al ser una puzolana natural es una fuente tremenda de sílice reactiva requerida para la síntesis de geopolímeros como conglomerante alternativo para el cemento Portland ordinario, con una huella ecológica baja por su simple extracción y con un coste relativamente bajo [121].

### 1.8 Justificación del problema

Como se ha puesto de manifiesto en los apartados anteriores en la actualidad tenemos que tomar conciencia de nuestra manera de producción, de fabricación y de la forma de como construimos nuestros edificios. Considerando que el cemento Portland es el conglomerante más utilizado a nivel mundial dentro del sector de la construcción y cuyo proceso de fabricación tiene un gran impacto medioambiental debido a sus grandes emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera, que ayudan a contribuir al cambio climático, es necesario empezar a buscar alternativas a su uso masivo y explorar el uso de otros materiales conglomerantes.

Con el aumento de la población en los próximos años se incrementarán la demanda de nuevas construcciones e infraestructuras es por ello que existe la necesidad de desarrollar nuevos conglomerantes más amigables con el medio ambiente y reducir la crisis medioambiental que está sufriendo nuestro planeta debido al incremento de emisiones de CO<sub>2</sub> en las últimas décadas y cuyas consecuencias se ven agravadas principalmente en países en desarrollo donde existe personas en situación de vulnerabilidad viviendo en asentamientos informales carentes de los servicios básicos (luz, agua, alcantarillado) y con pocos recursos para hacer frente a los efectos del cambio climático.

Dentro estos conglomerantes con menor coste energético se encuentra la cal, cuya durabilidad queda patente en las construcciones de antiguas civilizaciones que han sobrevivido a nuestros días y que hoy son nuestro patrimonio arquitectónico, pero con la llegada de la revolución industrial fueron desplazadas lentamente por el cemento, debido principalmente a

que este puede adquirir resistencias a tempranas edades de curado acelerando el proceso de la construcción.

Si bien la introducción de puzolanas naturales o artificiales en los conglomerantes a base de cal han mejorado sus propiedades mecánicas y de durabilidad, estas aún tienen el inconveniente de ganar resistencias a edades largas de curado, es por esta razón que en la presente tesis se busca eliminar este inconveniente técnico y lograr que los conglomerantes a base de cal adquieran resistencias mecánicas a las primeras edades de curado y puedan superar ese hándicap. Mediante la introducción de geopolímeros se pretende suplir esa falta de resistencia inicial. Los geopolímeros ya no son materiales desconocidos, los mismos en los últimos años han adquirido un gran interés en las investigaciones de la comunidad científica debido a todos los beneficios que aportan respecto a los conglomerantes a base de cemento Portland.

En este trabajo se estudiarán cuatro residuos que son: el catalizador gastado de craqueo catalítico, la ceniza de cascara de arroz, la tierra diatomea de origen residual y la ceniza de lodo de depuradora. También se estudia una puzolana natural proveniente de la República de Guatemala. Se utilizan estos residuos porque están disponibles en países en desarrollo, además al tratarse de residuos que generalmente son destinados a los vertederos, con esta investigación estamos volviendo a darles una segunda vida útil intentando cumplir los objetivos propuestos en la agenda 2030.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

En los últimos años, gracias al desarrollo de los morteros de reparación para el patrimonio arquitectónico, los conglomerantes a base de cal son objeto de investigaciones. Los morteros de cal son la mejor opción para la restauración de edificios antiguos, su uso está creciendo últimamente en el sector de la construcción debido a que los morteros de cemento tienen poca compatibilidad con los materiales originales causando daños patológicos como la expansión, exfoliación, eflorescencias salinas, etc.

Finalmente, al tratarse de una investigación que busca de nuevos conglomerantes destinados a su uso en países en desarrollo, también se analiza la posibilidad de generar prototipos de piezas de construcción que ayude al déficit de viviendas sociales, pensadas desde un punto de vista de autoconstrucción, siendo este el sistema más popular de la zona.

## **CAPÍTULO II**

-- \_ Objetivos \_ --

## 2 OBJETIVOS

La investigación se encuadra en la búsqueda de materiales de construcción que minimicen las emisiones de CO<sub>2</sub> mediante el uso de materiales alternativos a los convencionales utilizados actualmente en el sector de la construcción y que puedan ser aplicables en países en desarrollo.

Es por ello que en este trabajo se emplea cuatro residuos: el catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC), la ceniza de cascara de arroz (CCA), la tierra diatomea residual del filtrado de cerveza (TDR) y la ceniza de lodo de depuradora (CLD), también se emplea una tierra diatomea natural molida (TDN).

Se elaboran morteros cal/puzolana empleando como puzolanas: el FCC, la CCA y la CLD en distintas proporciones para optimizar las propiedades mecánicas.

Se propone como hipótesis de partida la mejora de las propiedades de las mezclas cal/puzolana mediante la adición de un material geopolimérico. Este último, está elaborado utilizando al FCC como precursor para todos los casos y se emplearan diferentes activadores alcalinos tanto comercial como alternativos. El activador comercial es una mezcla de silicato sódico e hidróxido sódico y los activadores alternativos son producto de la reacción entre el hidróxido de sodio y materiales ricos en sílice como la CCA, TDN y TDR.

Para cumplir con este objetivo, se prepararon varias probetas de los morteros mixtos y se analizaron utilizando una serie de técnicas de caracterización según el caso de estudio.

## OBJETIVOS

---

Con todo ello a continuación se enumera el que podría denominarse objetivo principal y varios objetivos específicos.

### **2.1 Objetivo general**

Desarrollar nuevos conglomerantes sostenibles a partir de residuos aplicados a los morteros cal/puzolana-geopolímero y estudiar sus propiedades mecánicas, microestructurales y de durabilidad a lo largo del tiempo.

### 2.2 Objetivos específicos

Para el cumplimiento del objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la compatibilidad en los conglomerantes cal/puzolana-geopolímero en distintas proporciones.
- Elaborar pastas con las mismas dosificaciones a las ensayadas mecánicamente para su caracterización a nivel microestructural.
- Estudiar la variación de las resistencias mecánicas con el tiempo de curado y el porcentaje de geopolímero añadido al mortero de cal/puzolana.
- Utilizar los activadores alcalinos alternativos, de menor coste económico y medioambiental en la preparación de morteros cal/puzolana-geopolímero.
- Realizar pruebas de durabilidad en los morteros mixtos, con el fin de estudiar como los tipos de geopolímero influyen en la vida útil del material.
- Generar un prototipo y ensayarlo para especificar posibles usos del mismo.

## **CAPÍTULO III**

**--\_ Metodología Experimental \_--**

### **3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Para desarrollar la parte experimental de la presente tesis se han utilizado diversos materiales y se han empleado diversas técnicas para llevar a cabo la caracterización físico-química tanto de materias primas como de especímenes endurecidos. En el presente apartado se hará una breve revisión tanto de los materiales como de las técnicas empleadas. Comenzaremos con la descripción de los materiales empleados.

#### **3.1 Materiales**

##### **3.1.1 La cal**

El hidróxido cálcico utilizado para la fabricación de los morteros de cal fue suministrado por la marca comercial Valenciana Cales Pascual S.L. con una pureza de 77 % cuya designación es CL 80-S según la norma UNE-EN 459-1 [26]

Para la realización de las pastas para estudios microestructurales se ha empleado la misma cal que para los morteros.

##### **3.1.2 Catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC)**

El uso del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) tiene dos aplicaciones, se utiliza como puzolana y también es el precursor para formar el conglomerante activado alcalinamente o geopolímero. El FCC utilizado fue suministrado por la empresa OMYA Clariana S.A.

## MATERIALES UTILIZADOS

---

(Tarragona, España). Posteriormente en el apartado de caracterización de los materiales se procederá a su descripción.

El FCC es el único material que va a actuar como precursor en el geopolímero y se procederá a su activación con distintas disoluciones activadoras que serán desarrolladas posteriormente en el presente texto.

### **3.1.3 Ceniza de cáscara de arroz (CCA)**

La ceniza de cáscara de arroz (CCA) fue proporcionada por la empresa Maicerías Españolas DACSA S.A proveniente de su planta de Tabernes Blanques (Valencia), la ceniza procede del proceso de cogeneración para la obtención de energía que dispone la propia empresa. Se ha empleado como puzolana y como fuente de sílice para generar un activador alternativo al silicato sódico. Su caracterización completa también se verá en el apartado de caracterización de materiales.

### **3.1.4 Ceniza de lodo de depuradora (CLD)**

La ceniza del lodo de depuradora (CLD) proviene de la planta de tratamiento de agua residuales que depura las aguas residuales de la ciudad de Valencia y que se encuentra situada en Pinedo (Valencia). La ceniza se recoge de los filtros electrostáticos en el incinerador de lecho fluidizado. En la investigación realizada la CLD se utiliza solamente como puzolana. Como el resto de materiales se describirá con mayor extensión en el apartado de caracterización.

### **3.1.5 Tierra de diatomea natural de Guatemala (TDN)**

La tierra de diatomea natural (TDN) es proveniente de la República de Guatemala, el banco de material es de origen natural de color blanco-beige y ha sido sometido a un proceso de molienda en el lugar de origen para mejorar su granulometría. Este material rico en sílice se utiliza para fabrica el activador alternativo al silicato sódico. Su caracterización se abordará en el apartado correspondiente.

### **3.1.6 Tierra de diatomea residual (TDR)**

La tierra diatomea residual (TDR) proviene del proceso de filtrado durante la elaboración de la cerveza y fue suministrada por Heineken proveniente de su planta de Quart de Poblet (Valencia). Al igual que la tierra diatomea natural esta tierra de diatomea residual se usa como fuente de sílice para generar un activador alternativo y posteriormente ser realizará un análisis completo en el apartado de caracterización.

### **3.1.7 Hidróxido de sodio**

El hidróxido de sodio (NaOH) utilizado es suministrado por la empresa Panreac Química S. A. cuya presentación es en formato de pellets con una pureza del 98 %.

También se ha utilizado el hidróxido de sodio de una pureza inferior al reactivo puro químico y que se puede adquirir en cualquier supermercado bajo la denominación de sosa caustica. Esta se vende en forma de perlas pequeñas, cuya composición química supera el 85 % de pureza. Ambos

## MATERIALES UTILIZADOS

---

reactivos químicos se usan en la preparación de las soluciones activadoras.

### 3.1.8 Silicato de sodio

El silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) también conocido como waterglass, se utiliza para preparar la solución activadora juntamente al NaOH. Este reactivo comercial fue suministrado por la empresa Merck, con la siguiente composición química: 8 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , 28 %  $\text{SiO}_2$  y 64 %  $\text{H}_2\text{O}$  en masa, presentando una densidad de  $1,35 \text{ g/cm}^3$  y un pH entre 11 - 11,5.

### 3.1.9 Árido

Las arenas empleadas para la fabricación de morteros son de origen silíceo, proceden de la empresa Caolines La Piedra (Liria, Valencia, España). Se ha buscado una granulometría similar a la arena normalizada CEN EN 196-1 citada en la norma UNE-EN 196-1 [122], para ello se realiza una mezcla de tres arenas denominadas: 1,5 (tamaño entre 1,2 a 2mm); 0,8 (tamaño entre 0,6 a 1,2 mm); y 0,4 (tamaño de 0,2 a 0,6 mm). Cuando se mezcla de las tres fracciones se obtiene como resultado una arena con un módulo de finura de 4,3.

### 3.1.10 Otros reactivos químicos

Se han empleado otros reactivos químicos como son la vaselina para recubrir los moldes y facilitar el proceso de desmoldar, o la acetona para detener el proceso de la reacción de geopolimerización en las distintas

pastas fabricadas. Ambos reactivos han sido suministrados por Panreac Quimica S.A.

### **3.2 Procedimientos experimentales**

Antes de empezar a describir los equipos empleados, primeramente, explicaremos a continuación la manera de preparar la disolución activadora, así como otros procedimientos experimentales como el proceso de amasado entre otros.

- Preparación de la disolución activadora

Conociendo que dentro de un proceso de activación alcalina uno de los componentes de la mezcla es el activador alcalino este se va a preparar por dos vías distintas; i) con el empleo de únicamente reactivos comerciales; ii) y la vía alternativa donde se sustituye el empleo del silicato sódico comercial por el empleo de las tierras de diatomeas (tanto natural como artificial) y la ceniza de cascara de arroz. Estos materiales debido a su alto contenido en sílice son utilizados para generar activadores alcalinos alternativos mediante su mezcla con NaOH generando un activador alcalino con menor impacto ambiental y de menor coste económico.

#### **3.2.1 Preparación de las disoluciones a partir de silicato sódico comercial (GCOM)**

La dosificación completa de los reactivos utilizados se mostrará en el apartado de resultados y discusión, pero a continuación, se detalla cómo se realiza su preparación:

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

---

En un vaso de plástico de 250 ml de capacidad se pesó la cantidad de agua en función del tipo de mortero a amasar y en un segundo recipiente de plástico se pesó el silicato comercial en función del cálculo del porcentaje de sustitución. Se pesa el hidróxido de sodio en forma de pellets según la cantidad calculada.

Seguidamente al recipiente del silicato comercial se le añade el agua y con la ayuda de un agitador magnético se mezclan ambos durante 30 segundos para luego añadir los pellets de hidróxido de sodio, hasta que este se haya disuelto completamente.

Finalmente, una vez que la disolución se haya homogeneizado se cubre el recipiente con un film de plástico y se deja reposar hasta que la disolución se enfríe puesto que la reacción producida es exotérmica (el tiempo requerido es de aproximadamente 2 horas).

En la Figura 34 se muestra el equipo y los materiales empleados para la preparación de la solución activadora.



Figura 34 Equipo y materiales usados para la preparación de la disolución activadoras con reactivos comerciales

### **3.2.2 Preparación de la disolución activadora con el uso de fuentes de sílice alternativas**

Para la preparación de la solución activadora a partir de fuentes de sílice alterativas (CCA, TDN y TDR) se procede de la siguiente manera:

En un recipiente de plástico de 100 ml de capacidad se pesó el agua y en otro recipiente se pesó el hidróxido de sodio.

Luego se pesó la cantidad necesaria de CCA, TDN o TDR, calculada a partir de su contenido en sílice, según el activador que se vaya a emplear.

En un recipiente termostatzado de 0,5 litros se añade la fuente de sílice correspondiente y el hidróxido de sodio, seguidamente se agita manualmente durante 30 segundos, homogeneizando la muestra en seco, para luego añadir el agua.

Finalmente, una vez que la disolución sea homogénea se la deja en reposo hasta 24 horas antes de su empleo para la fabricación del mortero. Durante las dos primeras horas la mezcla se agita y se abre ligeramente la tapa para evitar sobrepresiones en el interior del recipiente termostatzado.

En la Figura 35 se muestra el equipo empleado para la preparación de la solución activadora.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

---



Figura 35 Equipo y materiales usados para la preparación de las disoluciones alcalinas con fuente de sílice alternativa

### 3.2.3 Preparación de las pastas

Las dosificaciones elegidas para la fabricación de las pastas son la mismas que se han considerado para los morteros y se detallarán en el apartado de resultados y discusión.

Las pastas se preparan de la siguiente forma: en un recipiente de plástico de 50 ml de cierre hermético se pesa el agua, el NaOH y el  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  en el caso de las pastas mixtas cal/puzolana con geopolímero, y únicamente el agua en el caso de las pastas control; posteriormente se añaden los materiales sólidos correspondientes y con la ayuda de una varilla de vidrio se mezcla hasta obtener una pasta homogénea; finalmente se cierra el recipiente y se mantiene en la cámara húmeda ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) hasta la edad de curado escogida para el ensayo.

Cuando llega el día de ensayo establecido se extrae la muestra y para detener el proceso de reacción se procede a su molienda empleando un mortero de ágata, al cual se le añade acetona y se mezclan durante unos minutos, posteriormente se filtra la mezcla de la pasta y la acetona mediante bomba de vacío, para finalmente llevar la muestra a la estufa a 60 °C durante 30 min con el fin de evaporar la acetona que pueda quedar retenida en la muestra. Terminado el proceso de secado la muestra se pasa por el tamiz de 125 $\mu$ m y el material ya está listo para ser utilizado en las pruebas de ensayo. En la Figura 36 se muestra el instrumental necesario para realizar la homogeneización de la muestra con acetona y su posterior filtrado en bomba de vacío.



Figura 36 Equipo para la elaboración de pastas

### 3.2.4 Preparación de los morteros

Para el amasado de los morteros de cal/puzolana y de los morteros cal/puzolana-geopolímero se procedió en un primer momento a realizar las amasadas en dos amasadoras distintas.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

---

En una de las amasadoras se amasaba el geopolímero, donde primero se vertía la disolución activadora y a los 30 segundos se agregaba el precursor FCC hasta lograr una pasta homogénea a una velocidad lenta durante dos minutos.

Paralelamente en una segunda amasadora se vertía la cal y la puzolana (FCC, CCA o CLD) a una velocidad lenta y a los 30 segundos se agregaba el agua hasta la obtención de una mezcla homogénea (aprox. 2 minutos). Seguidamente se juntaban ambas pastas en una sola amasadora, y a partir de 1,5 minutos se empieza a agregar la arena hasta que el mortero este perfectamente homogéneo, empleando un total de 5 minutos aproximadamente para todo el proceso de amasado.

Posteriormente se procedió a simplificar el proceso de amasado para facilitar el proceso de mezclado y porque pensando en una posterior aplicación es más sencillo que todas las fases sólidas se añadan de una sola vez. Demostrado tras las pruebas realizadas que no existe evidencia significativa entre las dos formas de amasar en términos de resistencia mecánica de las mezclas, se eligió la forma de amasar conjunta del geopolímero y la mezcla cal/puzolana. Se describe a continuación el proceso seguido.

En la amasadora primeramente se vierte la parte líquida que consta del agua y del activador alcalino durante 30 segundos a velocidad lenta.

Se añade la parte sólida compuesta de la cal, la puzolana y el precursor previamente mezcladas en seco en la amasadora durante 2 minutos.

Una vez que se ha conseguido la homogeneidad de la pasta se añade la arena y se amasa hasta completar un tiempo total de 5 minutos, realizándolo siempre a velocidad lenta.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El mortero se vierte a moldes cúbicos de  $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  o rectangulares  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  que previamente se han recubierto de vaselina y luego del vertido se les lleva a una mesa vibradora, para después del vibrado con la ayuda de una regla metálica eliminar todo el exceso de mortero que rebosa del molde.

Finalmente, los moldes de las probetas se llevan a una cámara húmeda con una humedad relativa (HR) del 75 % y  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Una vez fraguado los morteros se desmoldan y se envuelven con film de plástico, para luego dejarlas nuevamente en la cámara hasta el día de su ensayo programado. En la Figura 37 podemos observar el equipo y materiales utilizados en la fabricación de los morteros mixtos.



Figura 37 Equipo y materiales usados en la preparación de morteros

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

---

### **3.2.5 Medida de la consistencia por el método de la mesa de sacudidas**

Para realizar este ensayo se siguieron las indicaciones de la norma UNE-EN 1015-3 [123] esta norma forma parte de los métodos de ensayos de los morteros para albañilería.

La consistencia es una medida de la fluidez y/o de la humedad del mortero fresco que proporciona la medida de una deformabilidad del mortero fresco cuando se le aplica un determinado esfuerzo, deformación debida a la cantidad de agua del mortero. Su fundamento se basa en el valor del escurrimiento que se determina midiendo el diámetro medio de una muestra de mortero fresco al que se le ha sometido un determinado número de sacudidas verticales, después de retirar el molde troncocónico de acero inoxidable.

El procedimiento es el siguiente:

Se vacía el mortero sobre el molde troncocónico al que previamente se le aplicó un lubricante con el fin de evitar la adherencia del mortero, este vaciado consta de 2 capas, cada capa se ha compactado con 10 golpes con la ayuda de un pisón de madera.

Se elimina el exceso de la mezcla con la ayuda de la regla metálica cuando se la enrasa, luego de 15 s se levanta el molde verticalmente.

Se le aplica 15 golpes en la mesa de sacudidas con una frecuencia constante para que el mortero se extienda sobre el vidrio de la mesa de sacudidas.

Finalmente, se mide el diámetro máximo y mínimo del mortero extendido en la mesa de sacudidas y se anota los resultados.

Debido a que se tiene diferentes porcentajes de sustitución de geopolímero, para este ensayo solo se ha considerado el 30 % de sustitución de mortero de cal/puzolana por el geopolímero y sus respectivos morteros control. En la Figura 38 podemos observar el equipo utilizado en estos ensayos.



Figura 38 Mesa de sacudidas para el ensayo de consistencia

### 3.2.6 Medidas de resistencias mecánicas

Para el estudio de las propiedades físicas de los morteros mixtos cal/puzolana-geopolímero con referencia a su resistencia mecánica se siguen las instrucciones de la normativa española EN 196-1 [122].

Se realizan medidas de resistencia a la compresión para los especímenes de  $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  o bien a las dos mitades de los especímenes rectangulares de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  obtenidas del ensayo a flexotracción.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

---

También se realizaron medidas de resistencia a flexotracción para los especímenes rectangulares de 40x40x160 mm<sup>3</sup>

### 3.2.6.1 Resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia mecánica a compresión se han realizado ensayos para las edades de curado de 1, 2, 3, 7, 28, 90, 180, 270 y 360 días. Para cada edad se rompieron 4 probetas en una prensa Instron 270 como la que se muestra en la Figura 39.



Figura 39 Prensa modelo Instron 270

### 3.2.6.2 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión de un mortero se determina aplicando una carga en tres puntos de la probeta de mortero endurecido hasta su rotura. Por ello en este ensayo se han realizado probetas de 40x40x160 mm, y para calcular la resistencia a la flexión se utilizó la siguiente ecuación:

$$R_{flex} = \frac{1,5 * F_f * l}{A^2}$$

Donde:

$R_{flex}$  Es la resistencia a flexión (MPa)

$F$  Es la carga máxima de rotura (N)

$L$  Es la distancia entre soportes (mm)

$A^2$  Es el área transversal de la probeta ( $\text{mm}^2$ )

En la Figura 40 podemos observar el equipo utilizado para este ensayo.



Figura 40 Equipo de medida de la resistencia a flexotracción

### ▪ Ensayos de durabilidad

Siendo la vida útil de un material de construcción una característica muy importante al momento de comportarse frente a los agentes atmosféricos se ha elegido 2 pruebas experimentales para evaluar el comportamiento de estos morteros mixtos cal/puzolana-geopolímero.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

---

### 3.2.7 Pruebas de absorción de agua por capilaridad

Para este ensayo se sigue el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1015-18 [124] para determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad de los morteros endurecidos que contienen conglomerantes minerales con áridos normales o ligeros.

Para calcular el coeficiente de absorción de agua se realizó mediante la siguiente expresión:

$$C = 0,1 (M2 - M1)$$

Donde:

C es el coeficiente de absorción de agua de una probeta individual de mortero en  $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$

M1 es la masa de la probeta después de una inmersión durante 10 min. en gramos

M2 es la masa de la probeta después de una inmersión durante 90 min. en gramos

Para este ensayo se han elaborado tres probetas de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , y los valores representados en el capítulo de resultados son la media de 6 probetas debido que cada probeta se divide en dos al momento de las pruebas experimentales.

En la Figura 41 podemos observar el sistema utilizado para la realización del ensayo.

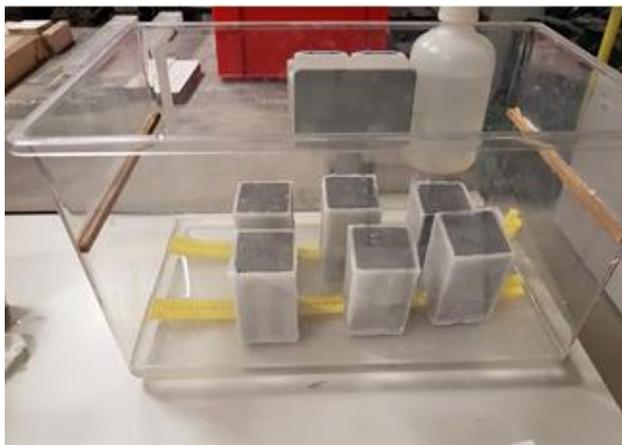


Figura 41 Prueba de absorción de agua por capilaridad

### 3.2.8 Ciclos de hielo y deshielo

No habiendo encontrado una norma específica para este ensayo en los moteros de cal/puzolana, se ha seguido como referencia las técnicas recogidas en la norma UNE EN 12371 [125], esta norma pertenece al grupo de ensayos de piedra natural. Este ensayo experimental se llevó a cabo en una cámara climática de la marca comercial INELTEC.

Para este ensayo se han elaborado probetas prismáticas de 40x40x160 mm<sup>3</sup> que han sido sometidas a 30 ciclos de hielo y deshielo, cuyo ciclo de hielo comprende 4 horas (1 hr a -10 °C y 3 hr a -15 °C), y el ciclo de deshielo comprende 2 horas a 20 °C, siendo 6 horas en total por cada ciclo. En la Figura 42 podemos observar este proceso.



### 3.3.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos X se ha utilizado para conocer el porcentaje en óxidos de las materias primas, aunque también se pueden expresar los resultados en composición elemental. La técnica se basa en la medida de la emisión secundaria de radiación X que se ha generado al excitar una muestra con una fuente de rayos X. Las medidas se realizan en un equipo modelo Philipis Magix Pro que se encuentra disponible en la Universidad de Alicante. En la Figura 43 se muestra una fotografía del equipo utilizado.



Figura 43 Equipo de fluorescencia de rayos X

La muestra objeto de análisis se puede analizar tanto en estado sólido como líquido. En nuestro caso se trata de muestras solidas con un tamaño inferior a 125  $\mu\text{m}$  para todas las muestras.

## EQUIPOS UTILIZADOS

---

### 3.3.2 Granulometría por difracción láser (ADL)

El análisis de granulometría por difracción láser o también conocido como análisis de tamaño de partícula por difracción de láser, es una técnica que nos permite conocer la distribución del tamaño de partículas de un material siempre que este tenga un tamaño inferior a 2000  $\mu\text{m}$ .

El equipo empleado para medir el tamaño de partícula es un modelo Mastersizer 2000 de Malvern Instruments y está representado en la Figura 44. El rango de partículas a medir que alcanza el equipo cubre los tamaños desde 0,02 a 2000  $\mu\text{m}$ . Las medidas en este tipo de equipamientos se pueden realizar tanto por vía húmeda como por vía seca pero el equipo propiedad del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) únicamente realizar medidas en vía húmeda. En el caso de muestras apelmazadas el equipo incluye una fuente de ultrasonidos que nos permitirá disgregar este tipo de muestras.

El equipo dispone de un software adaptado que nos proporciona información tanto de la distribución del tamaño de partículas como sobre el diámetro medio de las partículas. Proporciona información sobre los parámetros  $d(0,1)$ ,  $d(0,5)$  y  $d(0,9)$ . Estos parámetros representan el percentil por el cual, el 10, 50 y 90 % de las partículas, respectivamente, se encuentran por debajo del tamaño indicado.

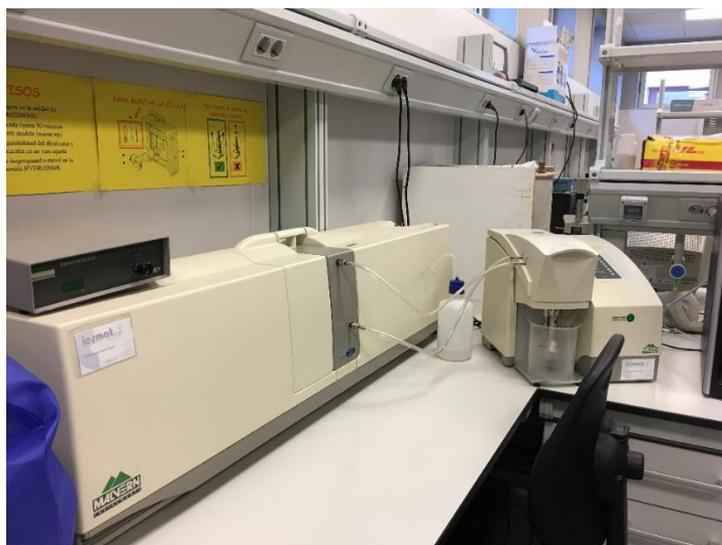


Figura 44 Equipo de granulometría por difracción laser

### 3.3.3 Análisis termogravimétrico (TG)

El análisis termogravimétrico es un método de análisis térmico en el que se registra continuamente la ganancia o pérdida de masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada al ir aumentando la temperatura de la misma. La representación de la masa o del porcentaje de masa en función de la temperatura se denomina termograma.

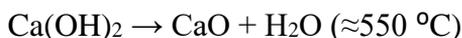
La curva derivada termogravimétrica (DTG) nos proporciona información sobre la velocidad de pérdida o ganancia de masa con la temperatura y permite identificar con mayor facilidad las variaciones de masa. Es especialmente útil para detectar pérdidas de masa pequeñas y para separar pérdidas de masa de procesos de pérdida o ganancia de masa cercanos en la curva termogravimétrica.

## EQUIPOS UTILIZADOS

---

Se usa esta técnica en la presente investigación para determinar la pérdida de masa de los productos formados tanto en la reacción puzolánica como en la reacción de geopolimerización.

Las reacciones de deshidratación de los productos formados en las pastas de cal/puzolana son fundamentalmente:



Donde:

SCH son los silicatos cálcicos hidratados;

ACH son los aluminatos cálcicos hidratados;

SACH son los silicoaluminatos cálcicos hidratados.

El principal producto de la reacción de geopolimerización es el gel geopolimérico tipo NASH, cuya pérdida de masa se registra alrededor de los 150 °C.

El equipo empleado fue un módulo TGA 850 Mettler-Toledo como el representado en la Figura 45. El equipo permite medir simultáneamente la curva termogravimétrica y la curva de análisis térmico-diferencial (DTA). Cuenta con una electrobalanza horizontal, un horno y sensores de temperatura, la electrobalanza tiene una resolución de 0,1 µg. El software de Mettler registra y procesa los datos y permite el tratamiento de las curvas registradas. Las condiciones de ensayo fueron las siguientes: i) temperatura de calentamiento desde 35 - 600 °C; ii) atmósfera de

nitrógeno con un flujo de 75 mL/min; iii) velocidad de calentamiento de 10 °C/min; iv) crisoles de aluminio sellables.



Figura 45 Equipo de Termogravimetría TGA 850 Mettler-Toledo

### 3.3.4 Difracción de rayos X (DRX)

La técnica de difracción de rayos X se ha utilizado para identificar la mineralogía de los materiales de partida.

El ensayo consiste en medir la desviación que sufre un haz primario o monocromático de rayos X cuando incide sobre una muestra. Los ángulos de difracción están íntimamente relacionados con la distancia entre los planos de la red cristalina del material, siguiendo la ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta$$

Dónde:

“n” es un número entero (orden de reflexión)

“λ” es la longitud de onda de los rayos X

## EQUIPOS UTILIZADOS

---

“d” es la distancia interplanar entre dos planos atómicos paralelos sucesivos en el cristal

“ $\theta$ ” es el ángulo de difracción formado con el plano atómico entre el haz incidente y el reflejado

Cada sustancia cristalina produce un único difractograma y posteriormente por comparación con patrones conocidos podemos identificar los compuestos cristalinos de una muestra problema.

En la Figura 46 se muestra el difractómetro de rayos X utilizado que corresponde al modelo Bruker AXS D8 Advance. Se ha utilizado la radiación  $K\alpha$  de Cu y monocromador secundario (filtro de Níquel) que elimina la radiación  $K\beta$  de Cu. La intensidad y voltaje del tubo generador de rayos X se ha ajustado en todas las medidas a 20 mA y 40 KV respectivamente. Se registraron los difractogramas para el intervalo  $2\theta$  entre  $5^\circ$  y  $70^\circ$ , con un ángulo de paso de 0,02 y un tiempo de acumulación de 2 segundos.

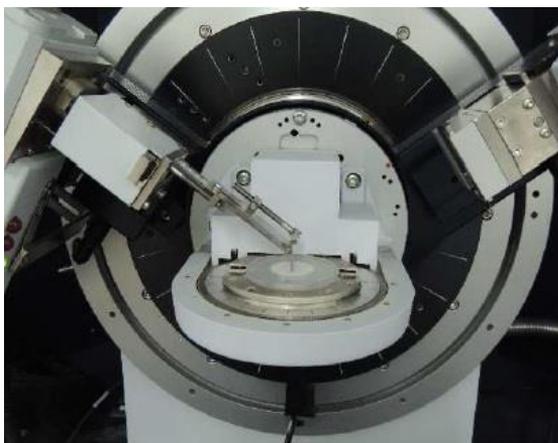


Figura 46 Difractómetro de rayos X

### **3.3.5 Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)**

Se ha utilizado esta técnica para conocer la morfología de los materiales de partida, así como para seguir la evolución de las pastas cal/puzolana y cal/puzolana-geopolímero. Esta técnica es una herramienta de gran potencial que ayuda a caracterizar la naturaleza física y química de la superficie de los sólidos a escala nanométrica, también para visualizar posibles formaciones de estructuras cristalinas debido a las reacciones que pueden ocurrir en los procesos de hidratación de los conglomerantes.

Para obtener una imagen por microscopía electrónica, la superficie de una muestra sólida es barrida según un modelo raster con un haz de electrones muy fino. Un raster es un modelo de barrido similar al utilizado en un tubo de rayos catódicos, en el que un haz de electrones barre la superficie en línea recta, vuelve a la posición inicial.

Dentro los diferentes tipos de señales producidos cuando el haz choca con la superficie de la muestra se analizan los electrones retrodispersados y secundarios que varían en función de la topografía de la superficie y que por tanto proporcionan una imagen de la misma. Este proceso se repite hasta que el área deseada de la superficie ha sido barrida.

Los electrones secundarios son de baja energía emitidos por los átomos de la muestra, por lo que permite obtener imágenes de la topografía de la superficie con altas resoluciones. Mientras los electrones retrodispersados, son electrones que han sido reflejados por colisiones

## EQUIPOS UTILIZADOS

---

con los átomos de la muestra, y son útiles para distinguir los diferentes tipos de materiales.

El equipo empleado es un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM) modelo ULTRA55 la marca ZEISS como el representado en la Figura 47.

Se trata de un instrumento que al igual que el SEM es capaz de ofrecer una amplia variedad de información procedente de la superficie de la muestra, pero con mayor resolución y con un rango de energía mucho mayor. Su funcionamiento es igual a SEM convencional, sobre la superficie de la muestra se barre un haz de electrones mientras que en un monitor se visualiza la información en función de los detectores del equipo.

El FESEM utiliza como fuente de electrones un cañón de emisión de campo que proporciona haces de electrones de alta y baja energía muy focalizados, lo que mejora notablemente la resolución espacial y permite trabajar a muy bajos potenciales, (2 kV en nuestro caso); esto ayuda a minimizar el efecto de carga en especímenes no conductores y a evitar daños en muestras sensibles al haz electrónico. Otra característica muy destacable de los FESEM es la utilización de detectores dentro de la lente (in lens). Estos detectores están optimizados para trabajar a alta resolución y muy bajo potencial de aceleración, por lo que son fundamentales para obtener el máximo rendimiento.

Antes de emplear el equipo es necesario colocar las muestras en el porta muestras y un proceso de metalización de la muestra con carbono.

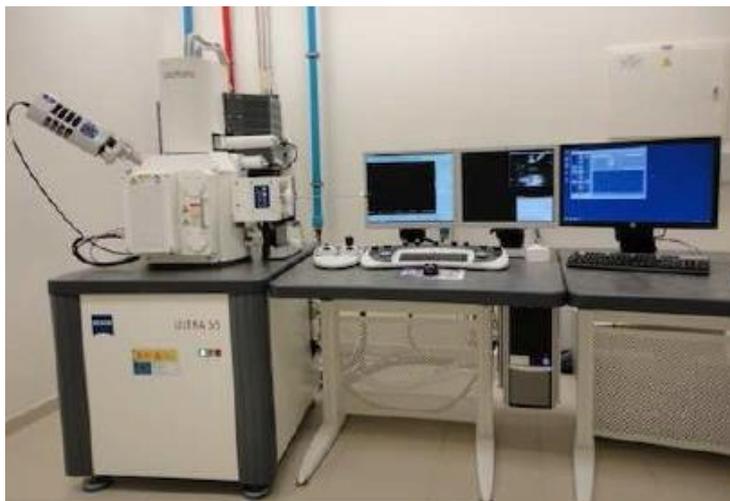


Figura 47 Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM)

### 3.3.6 Cámara climática

En la Figura 48 podemos observar la cámara climática de la marca comercial INELTEC, utilizada para los ensayos de los ciclos hielo-deshielo descrito en el apartado 3.2.8.

El equipo consta de Software de programación automática o manual para la adquisición, control y el análisis de los resultados, con un rango de temperatura desde  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$  y con gradientes de  $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Min}$  en frío y  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Min}$  en calor.

## EQUIPOS UTILIZADOS

---



Figura 48 Cámara climática INELTEC

## **CAPÍTULO IV**

**--\_ Resultados y Discusión \_--**

### **4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan todos los resultados obtenidos en la presente investigación. La primera parte comprende la caracterización físico-química de las materias primas empleadas para la realización de las mezclas mixtas cal/puzolana-geopolímero. Posteriormente se estudia a nivel micro estructural algunas proporciones escogidas de las pastas mixtas para luego continuar con el estudio de las propiedades mecánicas, los estudios de durabilidad de los morteros mixtos y finalmente una propuesta constructiva para realizar una posible aplicación con estas matrices.

#### **4.1 Caracterización de las materias primas**

Las técnicas empleadas para el análisis de las materias primas serán la fluorescencia de rayos X, la granulometría por difracción láser, la difracción de rayos X y la microscopia electrónica de barrido de emisión de campo

##### **4.1.1 Catalizador de craqueo catalítico (FCC)**

Como ya se comentó en el apartado experimental el FCC ha sido molido en fábrica y se utiliza tanto como puzolana en las mezclas cal/puzolana como precursor en la mezcla geopolimérica. A continuación, en la Figura 49, se muestra la curva granulométrica del material. Como se puede observar en la figura, el FCC presenta una distribución bimodal. El

## CARACTERIZACIÓN DE PUZOLANAS

estudio de los principales parámetros granulométricos muestra que el FCC tiene un diámetro medio de 19,93  $\mu\text{m}$ , y para los parámetros  $d(0,9)$ ,  $d(0,5)$  y  $d(0,1)$  obtuvo valores de 51,00  $\mu\text{m}$ , 12,78  $\mu\text{m}$  y 0,27  $\mu\text{m}$  respectivamente.

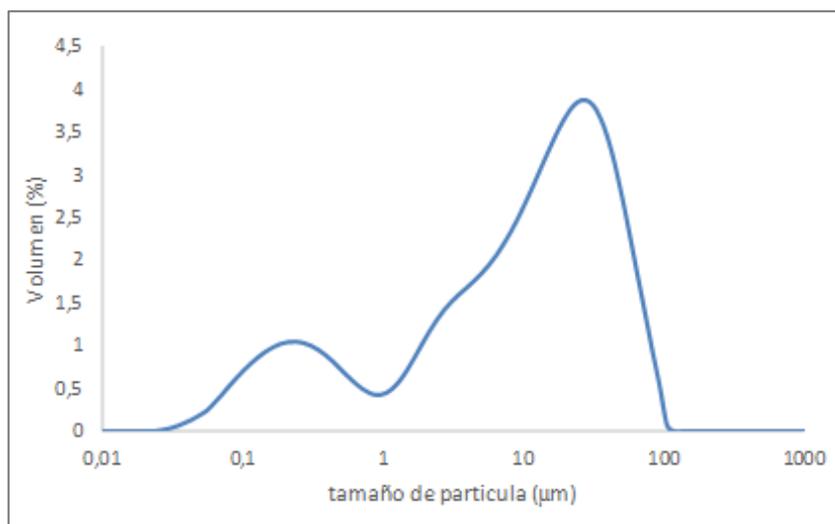


Figura 49 Distribución granulométrica del FCC

La composición química del FCC se muestra en la Tabla 1 como se puede observar más del 90 % de su composición lo comprende la suma del óxido de silicio y de aluminio.

Tabla 1 Composición química en porcentaje en peso de óxidos del FCC

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PF*
47,46	49,26	0,60	0,11	0,17	0,02	0,02	0,31	0,67	1,22	0,51

P.F\* pérdida al fuego medida a 900 °C durante 1 hora

En la Figura 50 se muestra el difractograma del FCC. Este material presenta un importante comportamiento amorfo, tal y como se aprecia en

la desviación de la línea base entre los valores de  $2\theta$  de  $15^\circ$  y  $30^\circ$ . Como principal fase cristalina se aprecia la presencia de la faujasita ( $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ , pdfcard 391380), y como fases cristalinas secundarias se observa la presencia de mullita ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ , pdfcard 150776); cuarzo ( $\text{SiO}_2$ , pdfcard 331161) y albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ , pdfcard 200554).

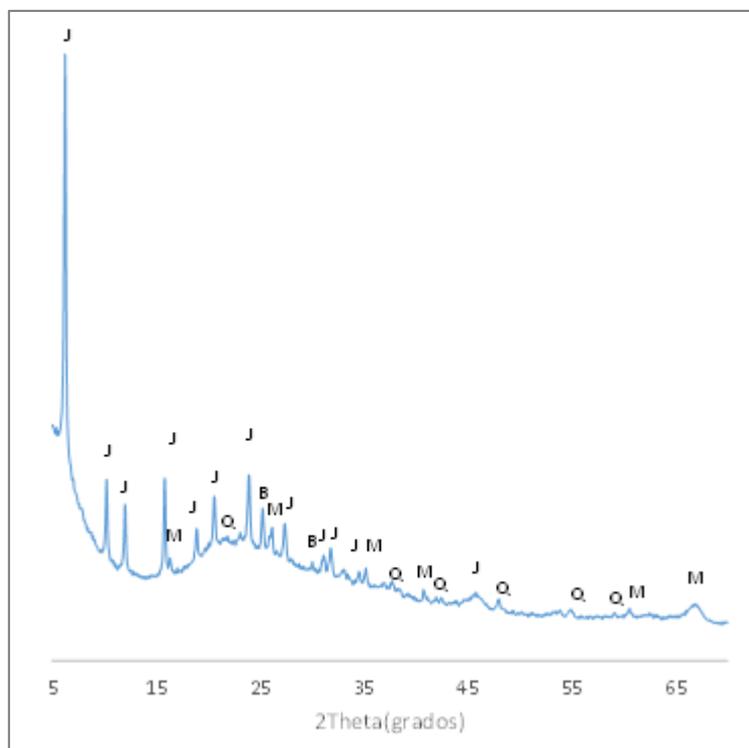


Figura 50 Difractograma del FCC (J-Faujasita, Q-Cuarzo, M-Mullita, B-Albita)

Por último, se ha caracterizado el FCC por microscopía electrónica de emisión de campo (FESEM) y se ha observado que al tratarse de un material ya molido no se mantiene ninguna estructura original del material. Se trata de un material pulverulento como se muestra en la Figura 51.

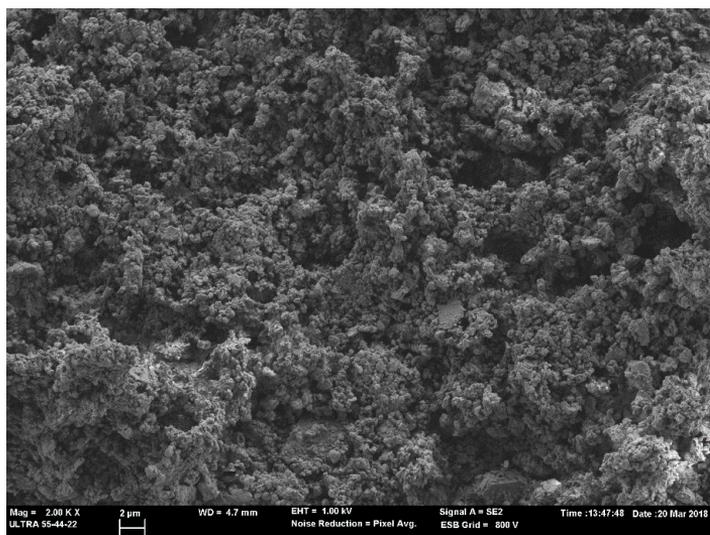


Figura 51 Micrografía del FCC a 2000 aumentos

### 4.1.2 Ceniza de Casca de Arroz (CCA)

La CCA la proporcionó DACSA pero posteriormente se molió en un molino industrial de la empresa Balalva durante 4 horas. Esta ceniza molida es la que se utilizó tanto como material puzolánico en los morteros cal/puzolana como para obtener el activador alternativo al silicato sódico. La Figura 52 muestra la distribución granulométrica de la CCA tras el proceso de molienda. La CCA presenta una distribución unimodal con un diámetro medio de partícula de 15,18  $\mu\text{m}$ . Los parámetros  $d(0,9)$ ,  $d(0,5)$  y  $d(0,1)$  tienen valores de 33,03  $\mu\text{m}$ , 11,07  $\mu\text{m}$  y 2,47  $\mu\text{m}$  respectivamente.

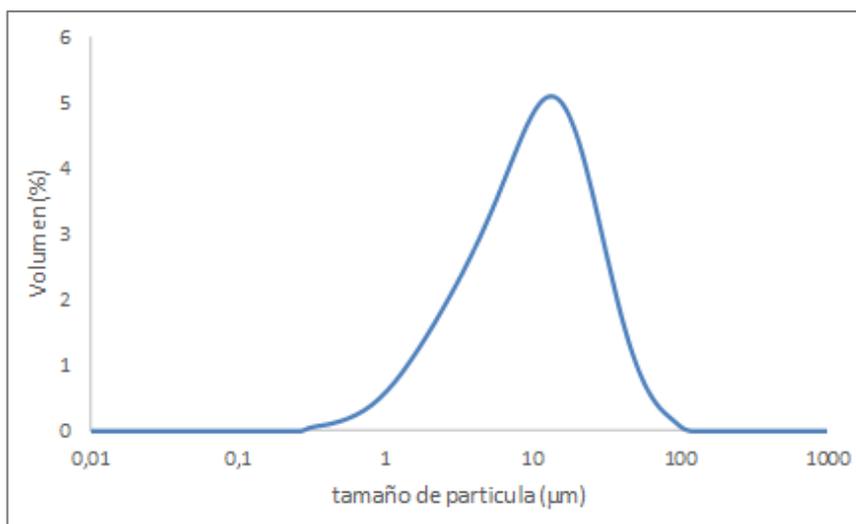


Figura 52 Distribución granulométrica de la CCA

La composición química de la ceniza se muestra en la Tabla 2. La CCA tiene como componente principal el óxido de silicio, superando el 85 % de porcentaje en peso.

Tabla 2 Composición química en porcentaje en peso de óxidos de la CCA.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl <sup>-</sup>	PF*
85,58	0,25	0,21	1,83	0,50	0,26	3,39	—	0,67	0,32	6,69

P.F\* pérdida al fuego medida a 900 °C durante 1 hora

La CCA presenta una naturaleza principalmente amorfa, tal y como se muestra en la Figura 53 donde se representa el difractograma de la ceniza. Como fases cristalinas aparece la presencia de cuarzo (SiO<sub>2</sub>, pdfcard 331161), tridimita (SiO<sub>2</sub>, pdfcard 391425) que son fases cristalinas del óxido de silicio y de manera minoritaria la silvina (KCl, pdfcard 411476).

## CARACTERIZACIÓN DE PUZOLANAS

---

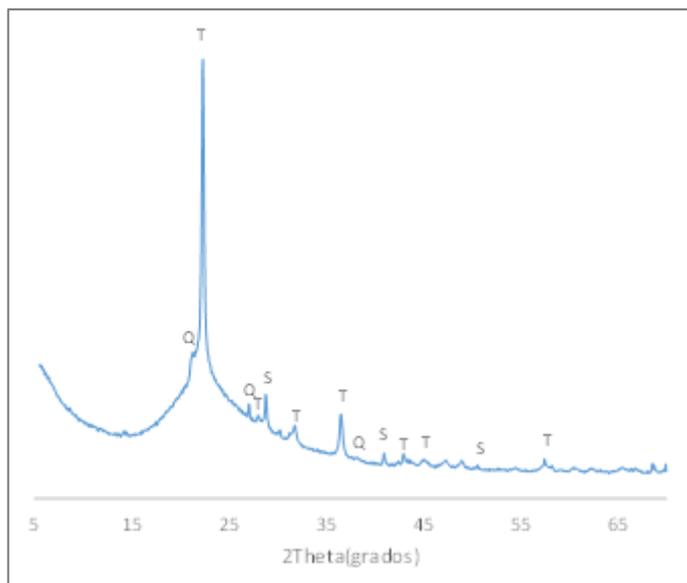


Figura 53 Difractograma de la CCA (Q-Cuarzo, T-Tridimita, S-Silvina)

En cuanto a la caracterización de la CCA molida por FESEM se observa un material muy similar al FCC, al tratarse de un material molido se ha destruido la estructura original propia de la CCA sin moler y en su lugar se observa un polvo de tamaño pequeño con alguna partícula de mayor diámetro tal y como se observa en la Figura 54.

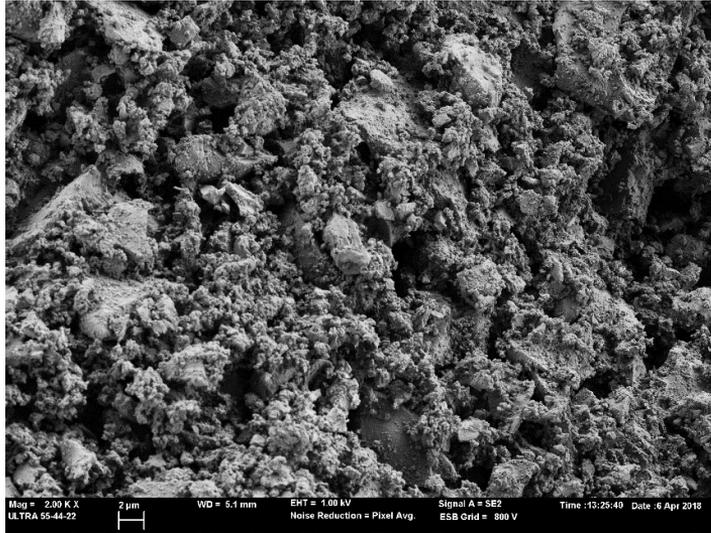


Figura 54 Micrografía de la CCA a 2000 aumentos

### 4.1.3 Ceniza de lodo de depuradora (CLD)

La CLD se utiliza como material puzolánico en las mezclas cal/puzolana y se utiliza sin moler. En la Figura 55 se muestra la curva granulométrica del material.

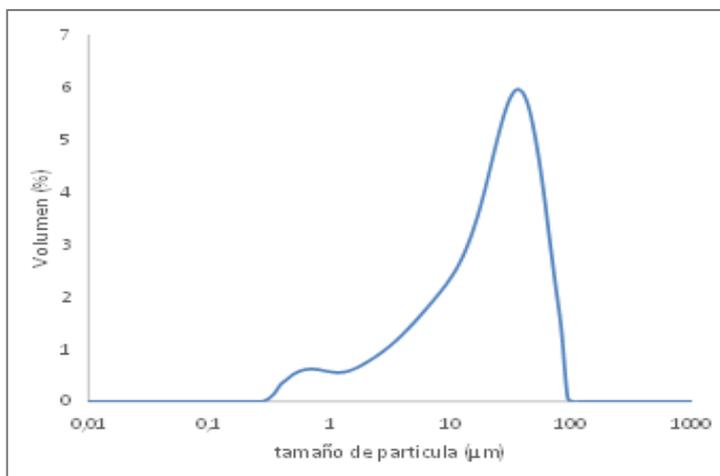


Figura 55 Distribución granulométrica de la CLD

## CARACTERIZACIÓN DE PUZOLANAS

---

La CLD presenta un diámetro medio de 28,34  $\mu\text{m}$ , los parámetros  $d(0.9)$ ,  $d(0.5)$  y  $d(0.1)$  tienen valores de 59,97  $\mu\text{m}$ , 24,05  $\mu\text{m}$  y 2,83  $\mu\text{m}$  respectivamente.

La composición química de la CLD se muestra en la Tabla 3. Los componentes mayoritarios son el óxido de silicio y el de calcio, teniendo un importante porcentaje de sulfatos.

Tabla 3 Composición química en porcentaje en peso de óxidos de la CLD.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Otros	PF*
26,43	10,39	7,66	31,96	2,63	8,57	2,00	0,40	5,92	1,83	2,20

P.F\* pérdida al fuego medida a 900 °C durante 1 hora

En la Figura 56 se muestra el difractograma de la CLD. En este caso la naturaleza de la muestra es más cristalina que en el caso de la CCA y el FCC, aunque presenta una ligera desviación de la línea base en el intervalo anteriormente nombrado. Como componentes cristalinos encontramos las siguientes fases: cuarzo (SiO<sub>2</sub>, pdfcard 331161); albita (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, pdfcard 200554), anhidrita (CaSO<sub>4</sub>, pdfcard 371496); óxido de calcio (CaO, pdfcard 371497); portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>, pdfcard 040733); hidroxiapatito (Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH), pdfcard 090432) y forsterita (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, pdfcard 340187).

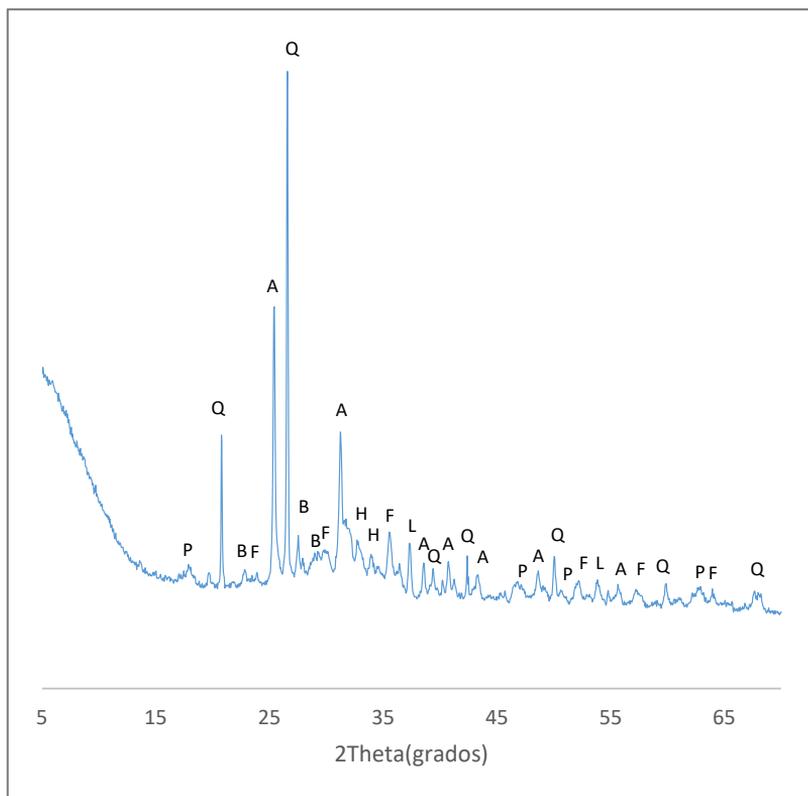


Figura 56 Difractograma del CLD (Q-Cuarzo, A-Anhidrita, L-óxido de calcio, P-Portlandita, H-Hidroxiapatito, F-Forsterita, B-Albita)

La micrografía de la CLD está representada en la Figura 57, en ella se muestra partículas esféricas. Como la muestra no está molida se mantiene la estructura original.

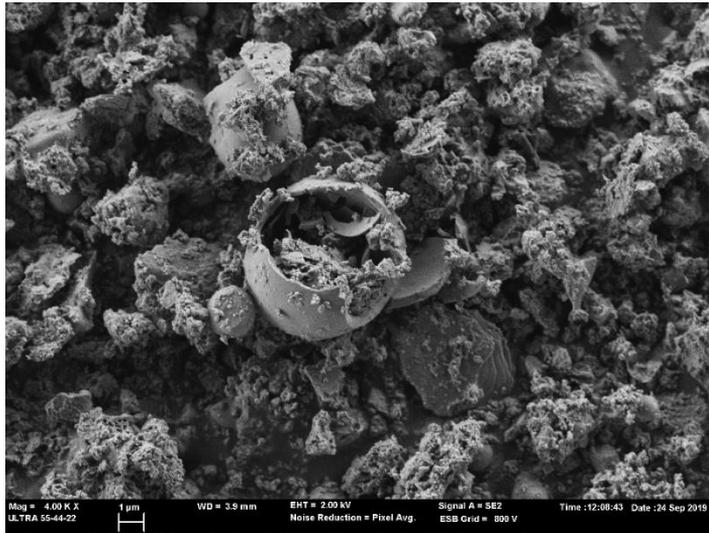


Figura 57 Micrografía de la CLD a 4000 aumentos

### 4.1.4 Tierra de diatomea natural de Guatemala (TDN)

La TDN se utiliza también en su estado original sin someterla a ningún tratamiento de molienda, en la Figura 58 se muestra la distribución granulométrica de la misma.

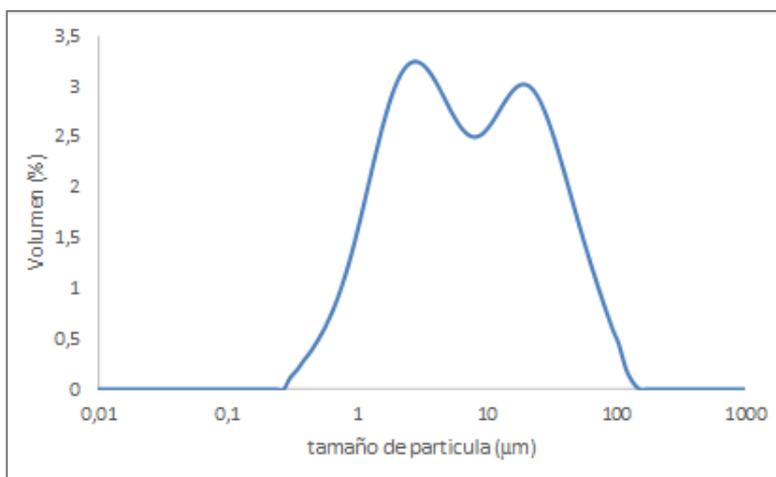


Figura 58 Distribución granulométrica de la TDN

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La TDN presenta un diámetro medio de 16,36  $\mu\text{m}$ , los parámetros  $d(0,9)$ ,  $d(0,5)$  y  $d(0,1)$  tienen valores de 43,78  $\mu\text{m}$ , 7,21  $\mu\text{m}$  y 1,34  $\mu\text{m}$  respectivamente.

En cuanto a su composición química ha sido elegida como fuente de sílice para fabricar el activador alcalino, teniendo un 76,36 % de contenido en dicho óxido. Este valor es inferior al porcentaje de sílice de la CCA, por ello se comparará el comportamiento de ambos materiales. En la Tabla 4 aparece la composición completa de TDN.

Tabla 4 Composición química en porcentaje en peso de óxidos de TDN

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Otros	TiO <sub>2</sub>	PF*
76,36	8,07	1,95	0,38	0,38	-	0,22	0,14	0,20	0,31	12,13

P.F\* pérdida al fuego medida a 900 °C durante 1 hora

En el difractograma de la TDN se observa una gran desviación de la línea base y como se muestra en la Figura 59 aparecen fases cristalinas principalmente asociadas a la sílice como la cristobalita (SiO<sub>2</sub>, pdfcard 391425) y el cuarzo (SiO<sub>2</sub>, pdfcard 331161). Como fases secundarias aparecen la caolinita (Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>, pdfcard 291488).

## CARACTERIZACIÓN DE PUZOLANAS

---

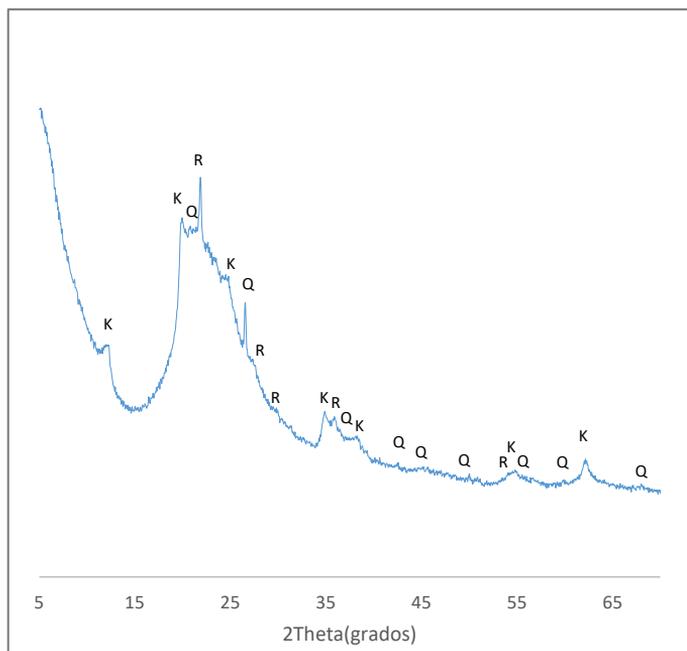


Figura 59 Difractograma de la TDN (R-Cristobalita, Q-Cuarzo, K-Caolinita)

Aunque la TDN no se ha molido en el laboratorio del ICITECH no se conocen las condiciones de la posible molienda previas en Guatemala, aunque como se ha visto que el tamaño de partículas es muy pequeño y en las imágenes obtenidas por FESEM se constata que se trata de un material pulverulento sin observarse las estructuras típicas de este tipo de materiales. El aspecto de la misma muestra en la Figura 60.

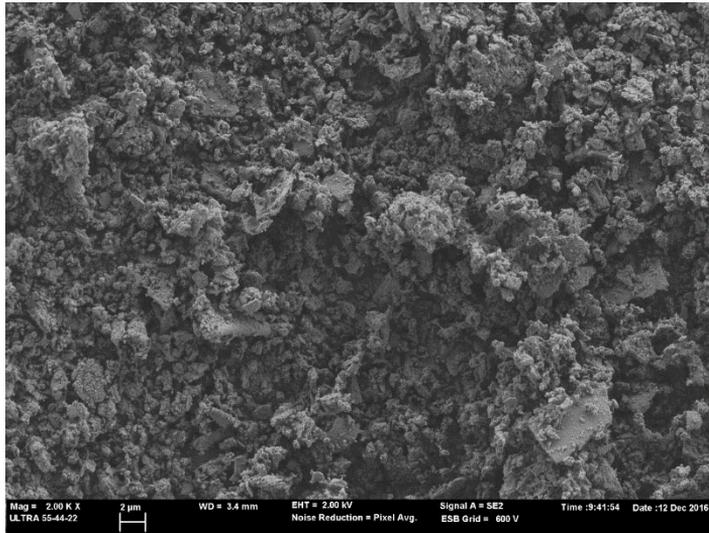


Figura 60 Micrografía de la TDN a 2000 aumentos

### 4.1.5 Tierra de diatomea residual de cerveza Heineken (TDR)

El tercer material empleado como fuente de sílice en el activador es la TDR, se va a trabajar con el también en su estado natural sin moler tras someterlo a un proceso de secado de 105 °C para eliminar la humedad. En la Figura 61 se muestra la distribución granulométrica de la misma. La TDR tiene una distribución unimodal, con un diámetro medio de 46,42  $\mu\text{m}$ , los parámetros  $d(0,9)$ ,  $d(0,5)$  y  $d(0,1)$  tienen valores de 93,23  $\mu\text{m}$ , 41,21  $\mu\text{m}$  y 7,90  $\mu\text{m}$  respectivamente.

## CARACTERIZACIÓN DE PUZOLANAS

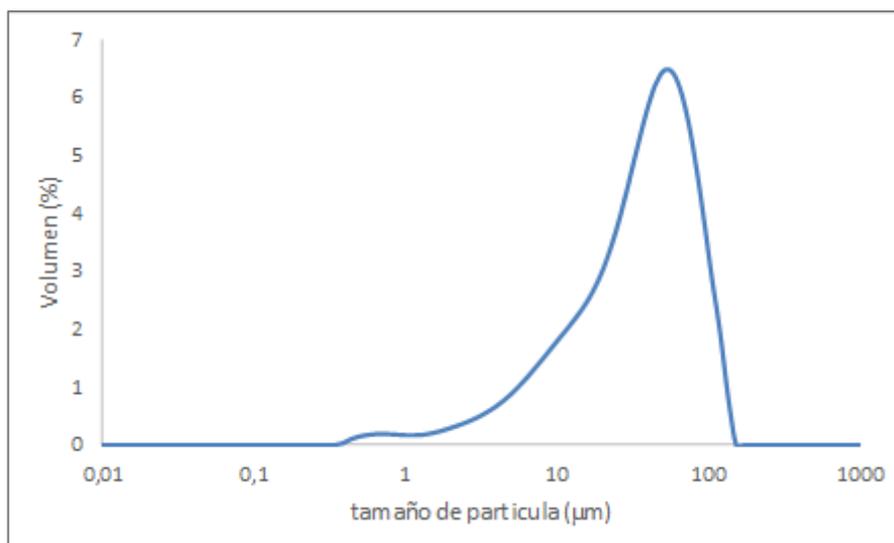


Figura 61 Distribución granulométrica de TDR

En la Tabla 5 aparece la composición química de TDR, el porcentaje de sílice es mayor que la que presentaba TDN.

Tabla 5 Composición química en porcentaje en peso de óxidos de TDR

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PF*
81,70	5,67	3,71	1,28	0,41	-	0,86	1,30	0,36	0,93	3,34

P.F\* pérdida al fuego medida a 900 °C durante 1 hora

El difractograma de TDR se muestra en la Figura 62, en dicha figura se observa que el material también tiene un fuerte carácter amorfo y como componentes principales aparece el cuarzo (SiO<sub>2</sub>, pdfcard 331161), la cristobalita (SiO<sub>2</sub>, pdfcard 391425) y la anortita (CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, pdfcard 411486).

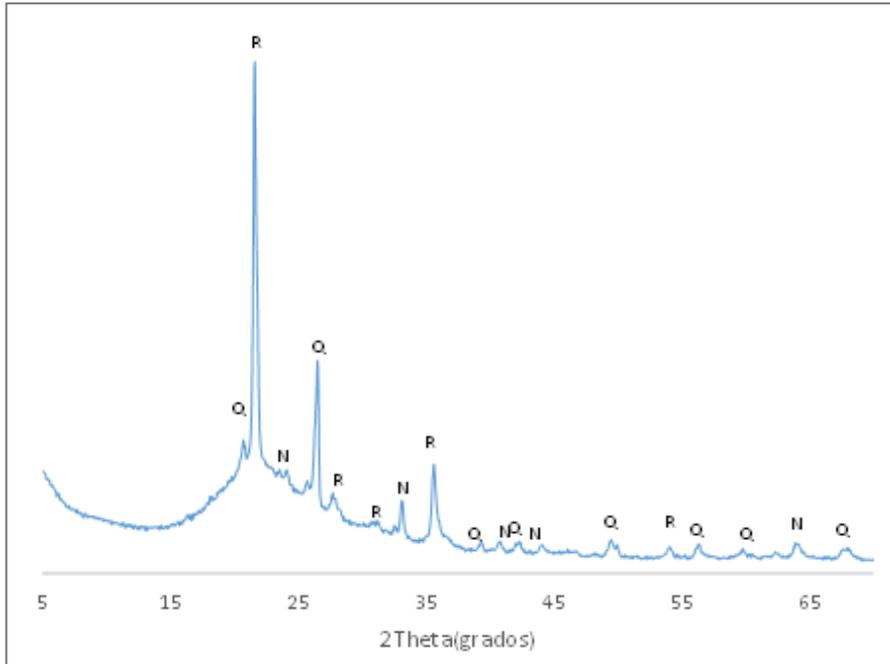


Figura 62 Diffractograma de TDR (Q-Cuarzo, R-Cristobalita, N-Anortita)

En el caso de TDR si aparecen las estructuras tubulares típicas de las tierras diatomeas. En la Figura 63 se muestra la micrografía de TDR.

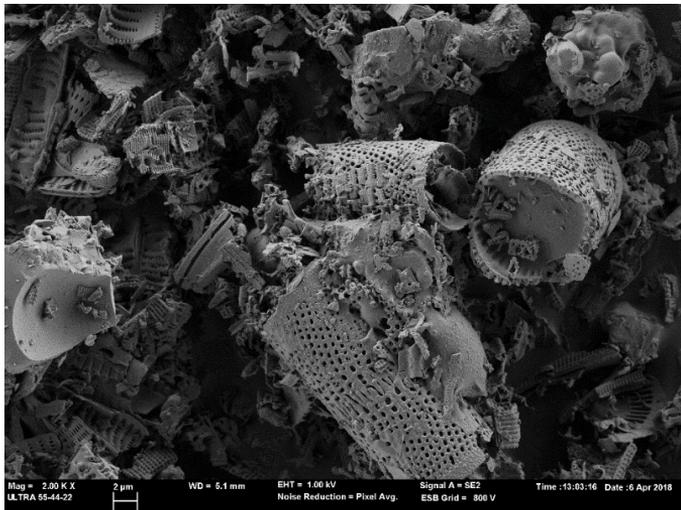


Figura 63 Micrografía de TDR a 2000 aumentos

## CARACTERIZACIÓN DE PUZOLANAS

---

Finalmente, para terminar este apartado mencionar que los materiales a utilizar como fuente de sílice en su composición química tienen altos contenidos de  $\text{SiO}_2$  siendo el mayor porcentaje para la CCA (85,58 %), seguido de la TDR (81,70 %) y la TDN (76,36 %).

### 4.2 Propiedades químicas de las pastas mixtas

Para la caracterización de las propiedades microestructurales se utilizan las siguientes técnicas: el análisis termogravimétrico y la microscopía electrónica de barrido. Por este motivo se prepararon pastas con las mismas dosificaciones que los morteros mixtos a una escala reducida, de tal forma que el procedimiento en su fabricación tenga las mismas características que en la fabricación de los morteros mixtos, cuyos procedimientos se describen en el apartado 3.2.3 y 3.2.4.

En este apartado se describirán en primer lugar las pastas con la puzolana del FCC, seguida por la CCA y la CLD, así mismo para cada puzolana se empezará con las sustituciones del geopolímero comercial y posteriormente con los geopolímeros alternativos propuestos.

Las pastas cal/puzolana tienen las siguientes relaciones: 1/1, 1/2, 1/3 para el binder cal/FCC, cal/CCA, y cal/CLD respectivamente, relaciones óptimas en base a estudios previos realizados por el grupo de investigación [101]. La relación agua/binder fue de 0,8 para todas las puzolanas y para preparar el activador del geopolímero comercial se emplea una relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  con un valor de 1,17 y una relación agua/FCC de 0,6 a partir del estudio de Bouzón et al. [38].

Para la mejor comprensión de las gráficas y tablas se utiliza la siguiente codificación: primero se describe el tipo de puzolana, seguido por el % de sustitución, luego el tipo de geopolímeros, así por ejemplo FCC 00 corresponde a la pasta control solamente con un binder de cal/FCC. Una pasta CCA 30GTDR representa al 70 % de binder cal/CCA y un 30 % de binder formado por geopolímero a partir de la tierra diatomea residual del filtrado de cerveza.

### **4.2.1 Análisis Termogravimétrico**

Al disponer de una gran cantidad de muestras, se ha tratado de buscar las muestras que representan los resultados más relevantes, en los diferentes porcentajes de sustitución de los geopolímeros propuestos.

Para las pastas cal/FCC y cal/CCA elaboradas con el geopolímero comercial, existe un trabajo preliminar [126], donde se estudió todos los porcentajes de sustitución (0 a 50 %), explicadas con mayor detalle.

#### **4.2.1.1 Análisis termogravimétrico de las pastas cal/FCC**

Para identificar las fases hidratadas en pastas cal/puzolana, y cal/puzolana-geopolímero, en la Figura 64 podemos observar la gráfica de la curva derivada termogravimétrica (DTG) para la pasta control cal/FCC (FCC 00) y también para la pasta 100 % geopolímero comercial, a los 28 días de curado y en un intervalo de temperatura de 35 a 600 °C.

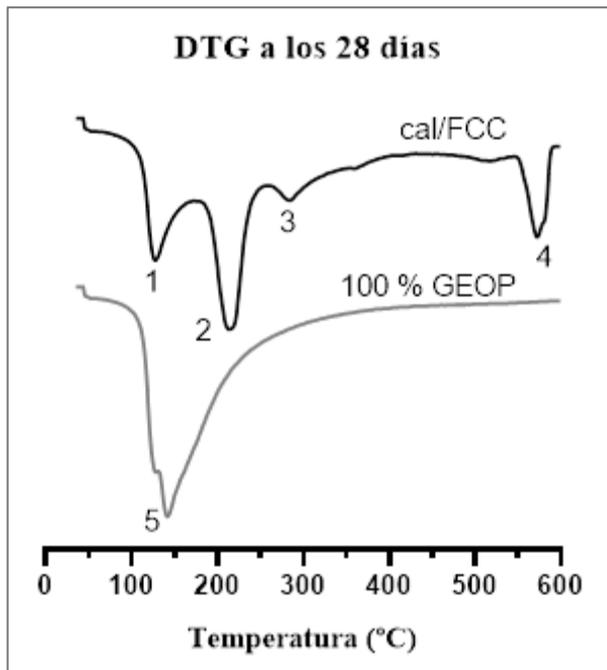


Figura 64 DTG para la pasta control FCC 00 y 100 % geopolímero comercial

El pico 1 corresponde a la deshidratación de los silicatos cálcicos hidratados SCH (100 - 180 °C), el pico 2 corresponde a la descomposición de los SACH y los ACH (180 - 240 °C) y la zona 3 corresponde también a productos de la misma naturaleza que los de la zona 2 pero de otra composición, por último, el pico 4 corresponde a la deshidroxilación de la portlandita (CH entre 520 - 580 °C) [54]. Denominamos el pico 5 como número correlativo a los anteriormente designados para los distintos geles de tipo NASH, que se dan entre los 100 - 250 °C [127].

Existen otras publicaciones de mezclas cal/MK que sitúan las pérdidas de masa en otros intervalos de temperatura. Gameiro et al. [128] sitúa en el intervalo de 150 °C la pérdida del agua combinada asociada a los SCH y

al ACH ( $C_2AH_{6,5}$ ) y sobre los 220 °C la pérdida de masa asociada al monocarboaluminato ( $C_4ACH_{11}$ ) y al silicoaluminato cálcico hidratado denominado stralingita o ghelenita hidratada ( $C_2ASH_8$ ). Bakolas et al. [129] también apunta a la formación de carboaluminatos en la zona de 180 - 200 °C para pastas de cal con puzolanas naturales.

Por lo tanto, cualquier fase hidratada debido a la pérdida de masa que presente las mezclas cal/FCC-geopolímero, debería tener un comportamiento intermedio entre las pastas anteriormente comentadas.

### **a. Pastas de cal/FCC geopolímero comercial**

En la Figura 65 se muestra la curva derivada termogravimétrica para la pasta control (FCC 00) en línea segmentada, 10 (FCC 10GCOM) y 30 % (FCC 30GCOM) de geopolímero elaborado con silicato sódico comercial.

Donde se observa que en la pasta control (FCC 00) el pico 4 asociado a la deshidroxilación del  $Ca(OH)_2$  se mantiene hasta los 28 días de curado, sin embargo, con la pasta del 10 % de geopolímero este pico solo está presente hasta los 7 días de curado, y con el 30 % de geopolímero este pico casi desaparece completamente a los 3 días de curado.

A medida que avanza el tiempo en la pasta FCC 00, los picos 1 (SCH), 2 (SACH) y 3 (ACH) están más desarrollados, y a los 90 días de curado el pico 4 (CH) desaparece, lo que significa que la puzolana ha consumido toda la cal durante la reacción puzolánica.

## PROPIEDADES QUÍMICAS

---

Las fases asociadas a la pérdida de masa para la pasta control (picos 1 - 4), corresponden también a las encontradas por Arizzi y Cultrone [55], quienes sustituyen el 10, 15 y 20 % de FCC por cal.

Con la adición del geopolímero el pico 1 (SCH) y el pico 5 (NASH) pueden estar solapados debido a que ambas pérdidas de masa ocurren en temperaturas cercanas. Las curvas DTG de las pastas FCC 10GCOM tienen unos picos más parecidos a la pasta control que a la pasta FCC 30GCOM. En todas las edades de curado coexisten los picos centrados alrededor de 150 °C y 200 °C.

En pastas FCC 30GCOM se establece como pico más desarrollado el centrado alrededor de 150 °C que se puede asignar a la presencia de geles tipo NASH y C(N)ASH. La presencia de calcio en una pasta donde predomina la reacción geopolimérica puede hacer que se desarrolle este último tipo de geles. En las pastas con mayor presencia de geopolímero apenas es visible el pico correspondiente a la pérdida de agua combinada de los geles tipo ACH y SACH.

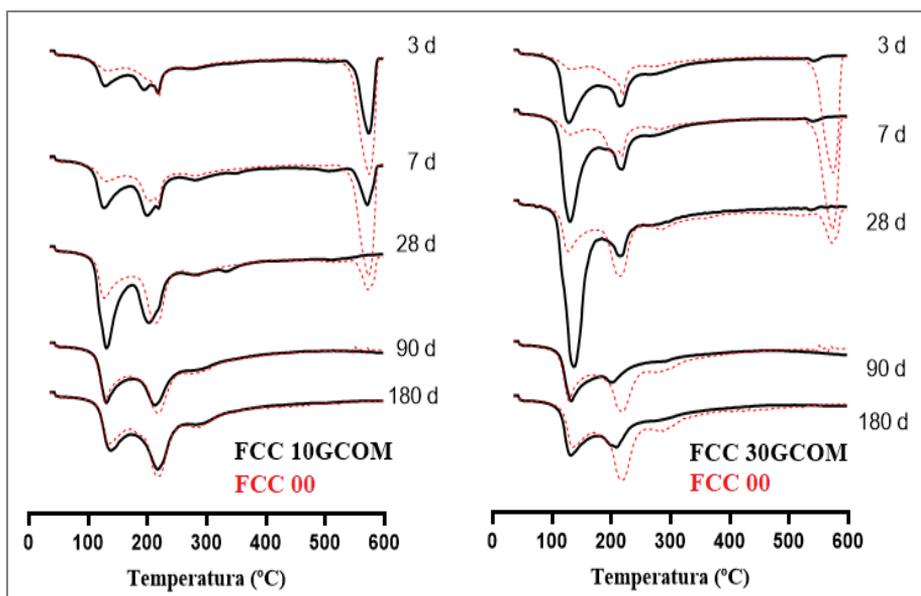


Figura 65 DTG para las pastas cal/FCC-geopolímero comercial

Parece evidente que la reacción geopolimérica predomina cuando el porcentaje de pasta geopolimérica alcanza un 30 % de la mezcla, donde la presencia de activador alcalino es mayor. Estos datos están en concordancia con los obtenidos por otros autores que confirman que en pastas MK/cal a mayor concentración de hidróxidos (mayor alcalinidad) el gel geopolimérico predomina sobre los productos puzolánicos que pasan a ser productos secundarios [130], [131], [132].

#### **b. Pastas de cal/FCC geopolímero a partir de CCA**

En la Figura 66 se muestra la curva derivada termogravimétrica para la pasta control (FCC 00) en línea discontinua, el 10 (FCC 10GRES) y 30 % (FCC 30GRES) de geopolímero elaborado a partir de ceniza de cascara de arroz como fuente de sílice en el activador.

## PROPIEDADES QUÍMICAS

---

La principal diferencia encontrada en la pasta FCC 10GRES respecto a su homóloga fabricada con el silicato comercial (FCC 10GCOM) es el pico 4 asignado a la deshidroxilación de la portlandita (CH) que en las pastas con silicato comercial estaba presente hasta los 7 días de curado y en este caso no se aprecia en las pastas fabricadas con el silicato alternativo, este cambio puede deberse a dos razones. Una de ellas es que parte de la ceniza de cáscara de arroz que no ha sido disuelta en la reacción de formación del activador también actuó como puzolana y consume parte del hidróxido de calcio presente en la pasta o que la reacción de geopolimerización sea más rápida con este tipo de activador que en el caso del silicato de sodio comercial. Posteriormente en el apartado de estudio de las propiedades mecánicas de los morteros se observará que a edades cortas de curado el activador alternativo obtiene mejores resistencias que los morteros realizados con el silicato comercial.

En la pasta FCC 10GRES se identifica los picos 1 (SCH), 2 (SACH) y 3 (ACH) y el pico 5 correspondiente a los geles NASH, que puede estar solapado con el pico 1. Pero como ya ocurría en la pasta con silicato comercial, la pasta FCC 30GRES presenta unas curvas DTG con predominio de un pico centrado sobre 150 °C donde podría coexistir la presencia de geles tipo NASH y C(N)ASH. Se observa un pequeño pico en la derivada que muestra la presencia de productos tipo ACH y SACH. En general, podemos observar que las pastas activadas con silicato comercial y alternativo apenas presentan diferencias entre ellas y podemos asumir que los productos formados son de naturaleza muy similar.

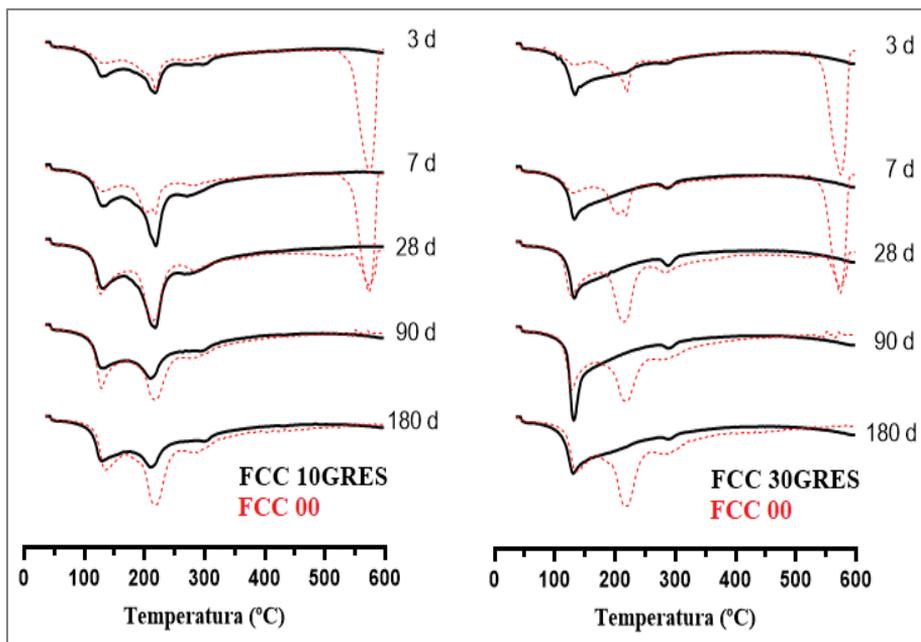


Figura 66 DTG para las pastas cal/FCC-geopolímero a partir de CCA

**c. Pastas de cal/FCC geopolímero a partir de tierra diatomea natural (TDN)**

Cabe indicar que, aunque en el caso anterior de las pastas con geopolímero comercial y geopolímero con cáscara de arroz, se escogió como las pastas a representar los porcentajes de un 10 y 30 % de geopolímero, para el estudio de las tierras de diatomea de Guatemala y la residual procedente de la industria de la cerveza solo se representa el 30 % de sustitución por el geopolímero.

En la Figura 67 se muestra la curva derivada termogravimétrica para la pasta control (FCC 00) en línea discontinua y la pasta con un 30 % (FCC 30GTDN) de geopolímero elaborado con una fuente de sílice alternativa

## PROPIEDADES QUÍMICAS

---

en la preparación del activador que en este caso fue la tierra diatomea natural procedente de la República de Guatemala.

Como ya ocurría en las pastas anteriores, el pico mayoritario para todas las edades de curado es el correspondiente al intervalo alrededor de 150 °C donde como se ha comentado anteriormente se descomponen los productos derivados de la reacción geopolimérica. La tierra diatomea aparte de ser fuente de sílice también puede actuar como puzolana, es por ello que alguna fracción no disuelta pueda reaccionar con la cal y formar productos de hidratación típicos de la reacción puzolánica. Esta podría ser una posible justificación a la falta del pico de la portlandita desde los 3 días de curado.

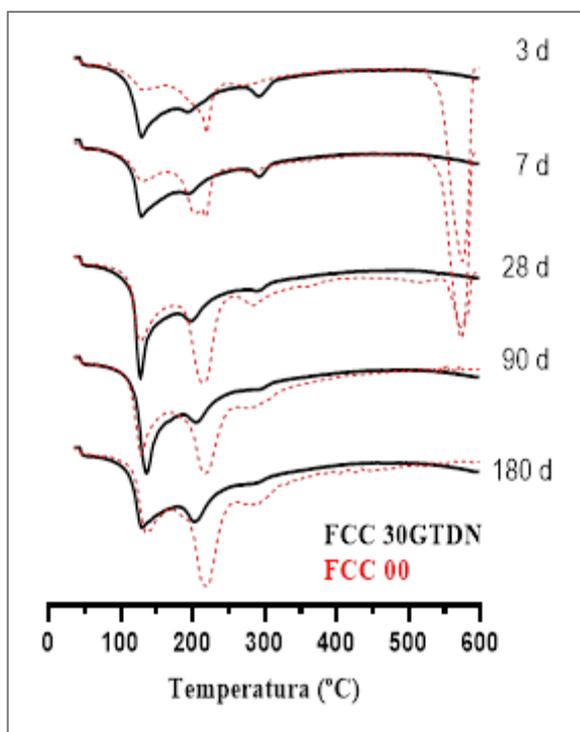


Figura 67 DTG para las pastas cal/FCC-geopolímero a partir de TDN

### **d. Pastas de cal/FCC geopolímero a partir de tierra diatomea residual (TDR)**

Por último, tenemos representadas las curvas derivadas termogravimétricas para el 30 % de este geopolímero a partir de TDR como fuente de sílice en la preparación del activador (FCC 30GTDR). Dichas curvas se representan en la Figura 68, junto a la DTG de la pasta control en líneas discontinuas.

Como en las anteriores pastas al emplear geopolímero existe un solapamiento entre el pico 1 (SCH) y el pico 5 (NASH). Tampoco se puede afirmar que la ausencia del pico 4 correspondiente a la deshidroxilación de la portlandita, se deba al consumo de la cal por parte de la reacción puzolánica o a la reacción geopolimérica.

El producto formado en la reacción geopolimérica cuando se utiliza como fuente alternativa de sílice una tierra diatomea residual no varía respecto al formado en una pasta activada con reactivos comerciales, este comportamiento ya fue reportado por Font et al. [41]. Si bien en los sistemas propuestos por Font et al. no existía la presencia de la cal aportada en este caso por la parte cal/puzolana y por tanto no existía la posibilidad de formación del producto C(N)ASH.

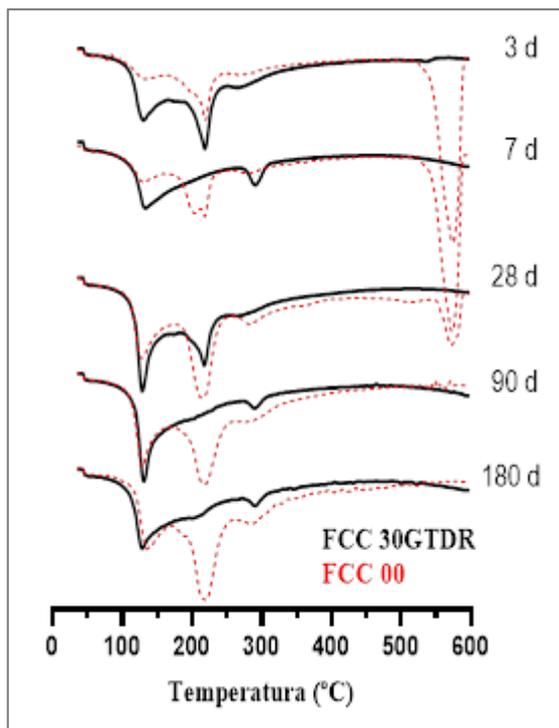


Figura 68 DTG para las pastas cal/FCC-geopolímero a partir de TDR

### e. Comparación de pastas cal/FCC control y con geopolímero

En las Tablas (6 - 10) se evalúan las pérdidas de masa obtenidas en las curvas TG para la pasta control y las distintas pastas con el 30 % de geopolímero activados con las distintas fuentes de sílice. Se han escogido cuatro tramos de pérdida de masa: de 50 a 180 °C, de 180 a 350 °C, de 500 a 600 °C, además de indicar la pérdida de masa total desde los 35 hasta los 600 °C que abarca todo el rango de temperatura del programa de calentamiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 6 Pérdidas de masa en % de las pastas FCC 00 a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

<b>Días</b>	<b>50 - 180 °C</b>	<b>180 - 350 °C</b>	<b>500 - 600 °C</b>	<b>35 - 600 °C</b>
3	1,954	5,181	6,837	15,874
7	2,765	5,898	6,233	17,416
28	4,681	9,891	1,435	20,614
90	4,513	10,396	–	20,798
180	4,615	12,448	–	20,847

Tabla 7 Pérdidas de masa en % de las pastas FCC 30GCOM a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

<b>Días</b>	<b>50 - 180 °C</b>	<b>180 - 350 °C</b>	<b>500 - 600 °C</b>	<b>35 - 600 °C</b>
3	6,574	3,593	–	14,873
7	6,721	4,373	–	15,021
28	6,830	4,956	–	17,432
90	6,965	5,025	–	17,678
180	5,951	5,231	–	16,873

Tabla 8 Pérdidas de masa en % de las pastas FCC 30GRES a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

<b>Días</b>	<b>50 - 180 °C</b>	<b>180 - 350 °C</b>	<b>500 - 600 °C</b>	<b>35 - 600 °C</b>
3	4,981	4,843	–	13,053
7	4,815	4,913	–	13,005
28	5,112	4,822	–	13,307
90	6,442	4,921	–	14,656
180	5,570	5,020	–	14,048

## PROPIEDADES QUÍMICAS

Tabla 9 Pérdidas de masa en % de las pastas FCC 30GTDN a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

Días	50 - 180 °C	180 - 350 °C	500 - 600 °C	35 - 600 °C
3	4,837	5,746	–	12,908
7	4,783	5,372	–	12,707
28	5,936	6,256	–	14,785
90	6,038	6,356	–	14,916
180	5,532	6,392	–	15,162

Tabla 10 Pérdidas de masa en % de las pastas FCC 30GTDR a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

Días	50 - 180 °C	180 - 350 °C	500 - 600 °C	35 - 600 °C
3	4,697	7,921	–	14,599
7	4,303	4,560	–	11,507
28	5,953	7,167	–	15,115
90	5,597	5,040	–	13,369
180	5,118	5,968	–	13,693

Del análisis de las pérdidas de masa podemos realizar varios comentarios. Como ya se observa al representar las curvas DTG de las pastas control FCC 00, los principales productos de reacción puzolánica son los SACH y los ACH, y así se refleja en las mayores pérdidas de masa en el intervalo de temperatura comprendido entre los 180 - 350 °C. Las pérdidas de masa totales también son superiores al de las pastas que contienen geopolímero, tal como se observa en la Figura 69.

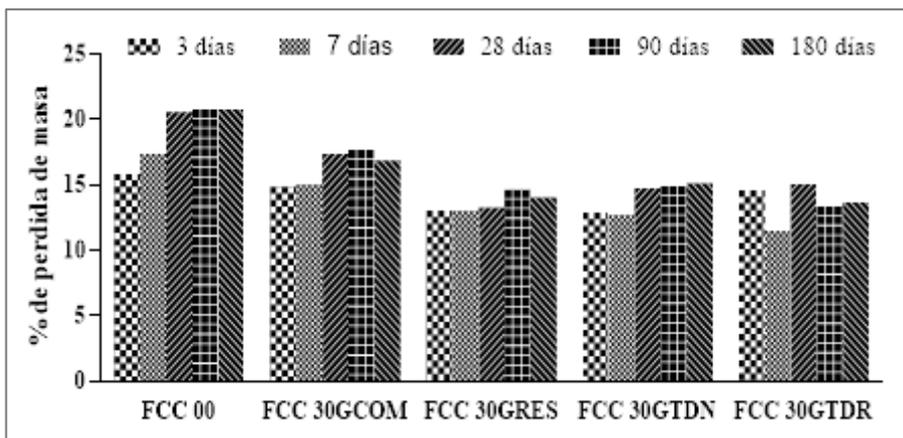


Figura 69 FCC- Porcentaje de pérdida de masa en el intervalo 35 - 600 °C

Cuando se analizan las pérdidas de masa de la pasta FCC 30GCOM se observa como la tendencia respecto a la pasta control cambia y ahora las mayores pérdidas de masa se dan en el intervalo de 50 - 180 °C. Este cambio se produce porque en este tipo de pastas los productos de reacción principal son los geles NASH y C(N)ASH. Pero se continúa teniendo pérdida de masa en el intervalo de 180 - 350 °C porque también coexisten los productos de la reacción puzolánica. Las pérdidas de masa totales son menores que las de la pasta control (Ver Figura 69). Lo que nos estaría indicando que el agua combinada de los productos de reacción es menor que las obtenidas en las pastas donde únicamente existía la reacción puzolánica. Esto mismo sucede para todas las pastas activadas con las otras fuentes de sílice. Cabe indicar además que las pérdidas de masa totales en las muestras con geopolímero también se diferencian entre sí, siendo la pasta activada con el silicato comercial la que mayor pérdida de masa presenta tal como se observa en la Figura 69. Que la pérdida de masa sea mayor no tiene por qué indicar que las resistencias mecánicas

## PROPIEDADES QUÍMICAS

---

vayan a ser mayores, tal y como se corroborará en el próximo apartado de la presente tesis.

Cuando se utilizan los activadores con las fuentes de sílice alternativa ocurre un fenómeno común a todas ellas, las pérdidas de masa ya no están tan centradas en el intervalo de 50 - 180 °C, igualándose o incluso siendo inferiores a las obtenidas al intervalo de 180 - 350 °C. Este fenómeno se debe a que existe un ensanchamiento de pico en las pastas con geopolímero alternativo tal y como se aprecian en las Figuras 66, 67 y 68. Al haberse escogido intervalos definidos la pérdida queda repartida entre ambos picos, alcanzando el principio del intervalo de 180 - 350 °C parte del pico anterior debido a ese ensanchamiento de pico.

Hacer hincapié en el hecho de que cuando coexisten la reacción puzolánica y la geopolimérica hay una mezcla de fenómenos que no son ajenos unos a otros y están todos interrelacionados. La presencia de calcio también afecta a la reacción geopolimérica. García-Lodeiro et al. [133] explica la conversión de los geles NASH a C(N)ASH, de hecho, apuntan a que dependiendo de la cantidad de calcio podría existir una conversión total a geles SACH.

### **4.2.1.2 Análisis Termogravimétrico de las pastas cal/CCA**

Tal como se realizó en el caso anterior con las pastas cal/FCC, primero identificamos los picos asociados a las pérdidas de masa para la pasta control (CCA 00) curadas durante 28 días representadas en una DTG de la Figura 70, donde podemos observar que la pasta control presenta el pico 1 (100 - 180 °C) asociado a los geles SCH, el pico 4 (520 - 580 °C)

que corresponde a la deshidroxilación de la cal (CH) no se observa en este caso. Recordar que en esta pasta cal/puzolana la relación entre ellas es 1/2 y por tanto ya se ha consumido toda la cal por parte de la CCA. Tampoco se observan los picos 2 y 3 representados en la Figura 64 (DTG FCC 00), debido a que la ceniza de cáscara de arroz apenas presenta óxido de aluminio en su composición y por lo tanto no se forman ni aluminatos ni silicoaluminatos cálcicos hidratados. Estos resultados concuerdan con Billong et al. [69], quien menciona que la sílice amorfa de la CCA reaccionó con la cal para formar los SCH como única fase hidratada formada.

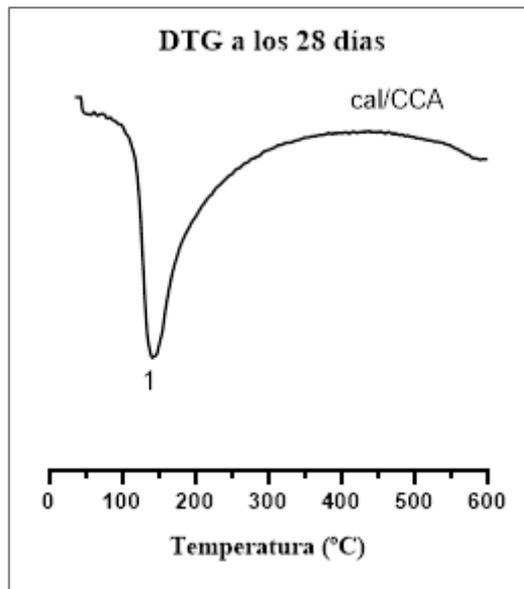


Figura 70 DTG para la pasta control cal/CCA a los 28 días de curado

## PROPIEDADES QUÍMICAS

---

### a. Pastas de cal/CCA geopolímero comercial

En la Figura 71 podemos observar las gráficas de la curva derivada termogravimétrica, para la pasta control (CCA 00), el 10 % de geopolímero (CCA 10GCOM) y el 30 % de geopolímero (CCA 30GCOM). La pasta control se representa en línea discontinua.

En la pasta control hasta los 7 días de curado está presente el pico 4 correspondiente a la deshidroxilación de la cal, pero en edades largas de curado solo se tiene el pico 1 (SCH), que tiene una mayor intensidad del pico a mayores edades de curado que en las edades cortas.

Al añadir el geopolímero, el pico 4 (CH) en la pasta con el CCA 10 GCOM está presente hasta los 2 días de curado, sin embargo, con la pasta con el CCA 30 GCOM este desaparece desde el primer día de curado, lo que podría significar que la reacción geopolimérica es más rápida a mayor porcentaje de sustitución o que la presencia del FCC también activa la reacción puzolánica por parte de este.

Si bien el pico 2 (SACH) no está presente en la pasta control, en la pasta con el CCA 30GCOM si se observa este pico en las primeras edades de curado, la formación de este pico puede ser debido al contenido de la alúmina del FCC que utilizamos como precursor en la reacción geopolimérica y que forma parte de la reacción puzolánica, además este pico es más visible a mayor % de sustitución.

También en las pastas con el geopolímero (10 y 30 %) están presente los geles NASH (pico 5) que están solapados con el pico 1 (SCH), que no podemos identificarlos con claridad debido a que está pérdida de masa ocurre a temperaturas entre rangos similares. Como ya ocurría en el caso

de las pastas con FCC como puzolana, seguramente se produzca la formación de geles tipo C(N)ASH.

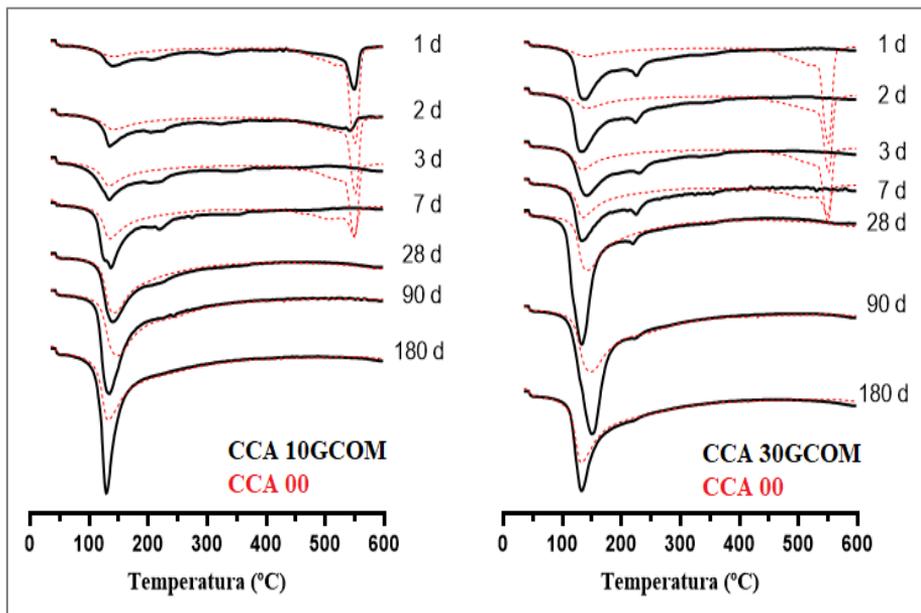


Figura 71 DTG para las pastas cal/CCA-geopolímero comercial

### b. Pastas de cal/CCA geopolímero a partir de CCA

En la Figura 72 podemos observar la DTG para la pasta control (CCA 00) en línea discontinua, el 10 % (CCA 10GRES) y el 30 % (CCA 30GRES) de geopolímero alternativo a partir de la CCA.

Con la pasta control están presentes los picos 1 (SCH) y 4 (CH), pero este último, solo está en las edades cortas de curado (1 a 7 días). Y en las pastas con el CCA 10GRES y el CCA 30GRES podemos observar solo los picos 1 (SCH) y 5 (NASH), tanto en edades cortas como en edades largas de curado.

## PROPIEDADES QUÍMICAS

Podemos afirmar que no cambian los productos de reacción observados al variar la fuente de sílice. Es difícil cuantificar que parte de la ceniza de cáscara de arroz que forma parte del activador ha sido disuelta, si suponemos que hay un porcentaje de ella que no hemos logrado disolver ocurriría que sería material potencialmente objeto de reacción con la cal de la fracción de la pasta cal/CCA y por tanto consumir dicha cal. Esa puede ser la razón por la que no observamos el pico de la portlandita en la pasta CCA 10GRES a 1 y 2 días de curado mientras que en la pasta CCA 10GCOM si se observaba dicho pico.

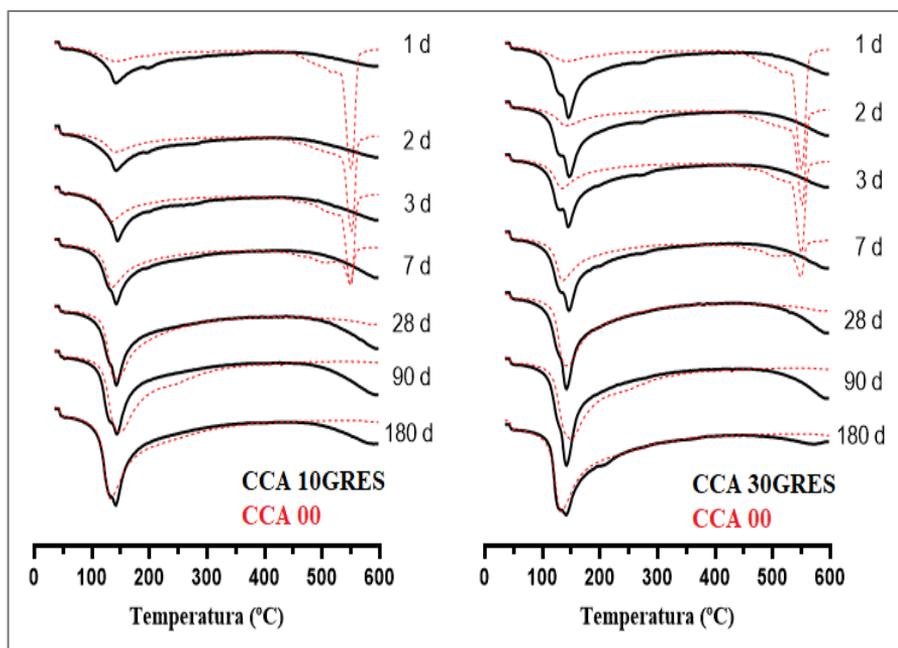


Figura 72 DTG para las pastas cal/CCA-geopolímero a partir de la CCA

### c. Pastas de cal/CCA geopolímero a partir de tierra diatomea natural

En la Figura 73 podemos observar que en las pastas con el CCA 30GTDN presenta solo los picos 1 (SCH) y 5 (NASH), o en su defecto el gel C(N)ASH, tanto en edades cortas como en edades largas de curado.

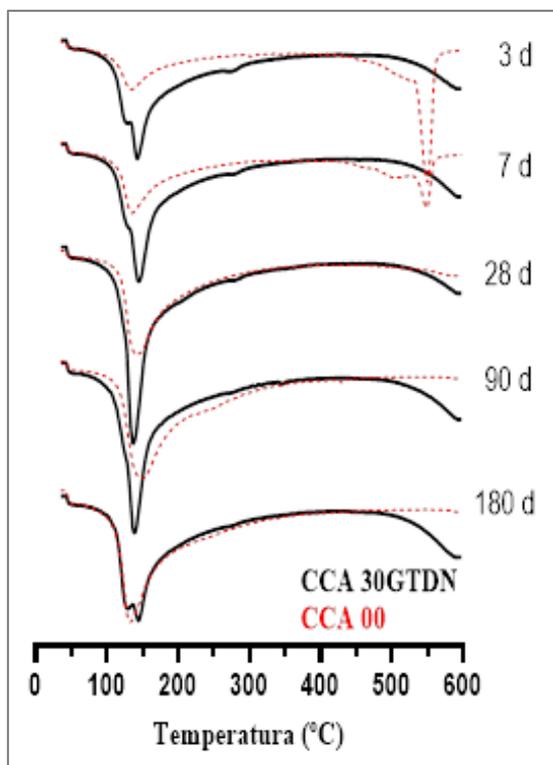


Figura 73 DTG para las pastas cal/CCA-geopolímero a partir de la TDN

No parece existir por tanto ninguna diferencia sustancial al cambiar las fuentes de sílice en la preparación del activador en cuanto a los picos observados en las figuras de la DTG.

#### **d. Pastas de cal/CCA geopolímero a partir de tierra diatomea residual**

## PROPIEDADES QUÍMICAS

---

Un caso similar a los geopolímeros a partir de la fuente de sílice de TDN se presenta al utilizar la TDR con los picos 1 (SCH) y 5 correspondiente a los geles NASH o C(N)ASH, tal como observamos en la Figura 74, donde las curvas de la DTG son prácticamente de la misma forma que las obtenidas en la Figura 73.

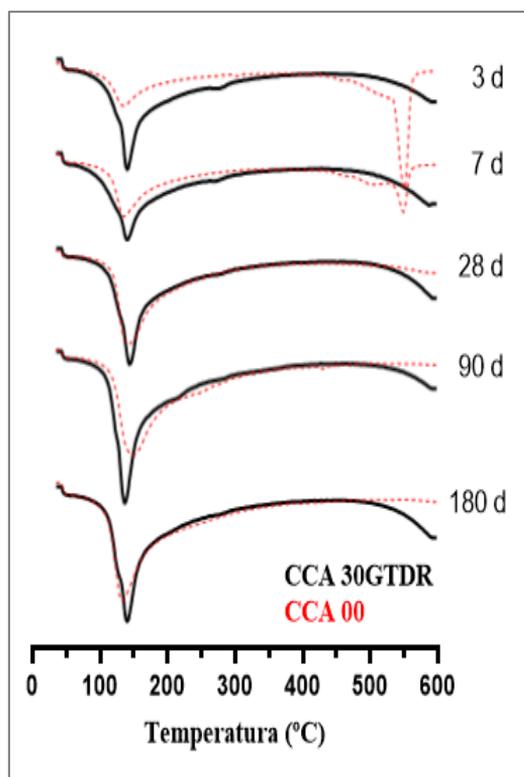


Figura 74 DTG para las pastas cal/CCA-geopolímero a partir de la TDR

### e. Comparación de pastas cal/CCA y con geopolímero

Como ya se realizó con las pastas con FCC como puzolana a continuación en las Tablas (11-15) se muestran las pérdidas de masa de las curvas TG en los mismos intervalos de temperatura que los escogidos anteriormente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 11 Pérdidas de masa en % de las pastas CCA 00 a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

<b>Días</b>	<b>50 - 180 °C</b>	<b>180 - 350 °C</b>	<b>500 - 600 °C</b>	<b>35 - 600 °C</b>
3	2,387	1,578	2,595	9,068
7	3,234	2,288	1,662	9,333
28	5,328	3,863	–	11,971
90	6,046	5,601	–	13,702
180	6,608	5,108	–	13,528

Tabla 12 Pérdidas de masa en % de las pastas CCA 30GCOM a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

<b>Días</b>	<b>50 - 180 °C</b>	<b>180 - 350 °C</b>	<b>500 - 600 °C</b>	<b>35 - 600 °C</b>
3	5,022	3,076	–	12,820
7	5,656	4,852	–	13,229
28	6,734	4,806	–	17,021
90	6,487	5,580	–	16,273
180	7,629	5,613	–	15,246

Tabla 13 Pérdidas de masa en % de las pastas CCA 30GRES a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

<b>Días</b>	<b>50 - 180 °C</b>	<b>180 - 350 °C</b>	<b>500 - 600 °C</b>	<b>35 - 600 °C</b>
3	5,309	3,773	–	12,976
7	5,619	3,852	–	13,525
28	6,408	4,206	–	15,021
90	6,855	4,225	–	15,273
180	7,023	5,297	–	15,419

## PROPIEDADES QUÍMICAS

Tabla 14 Pérdidas de masa en % de las pastas CCA 30GTDN a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

Días	50 - 180 °C	180 - 350 °C	500 - 600 °C	35 - 600 °C
3	5,163	4,477	–	13,052
7	5,634	4,568	–	13,650
28	7,111	5,234	–	15,479
90	7,193	4,307	–	15,536
180	6,504	4,442	–	15,485

Tabla 15 Pérdidas de masa en % de las pastas CCA 30GTDR a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

Días	50 - 180 °C	180 - 350 °C	500 - 600 °C	35 - 600 °C
3	5,324	3,998	–	11,925
7	4,983	3,471	–	12,844
28	5,549	4,034	–	13,118
90	7,049	5,075	–	15,335
180	6,495	4,652	–	14,970

Del análisis de las pérdidas de masa de las curvas TG de las pastas que contienen a la CCA como puzolana se pueden extraer las siguientes conclusiones:

En Figura 75 se representa los % de pérdida de masa total para las pastas cal/CCA y geopolímeros correspondientes al intervalo 35 - 600 °C, donde podemos observar que la pasta control CCA 00 tiene menores pérdidas de masa que su homóloga con FCC. En este caso las diferencias de pérdidas de masas entre las distintas fuentes de sílice son menos acusadas que para el caso del FCC y las proporciones de pérdidas de masa son muy parecidas entre todas las pastas con geopolímero.

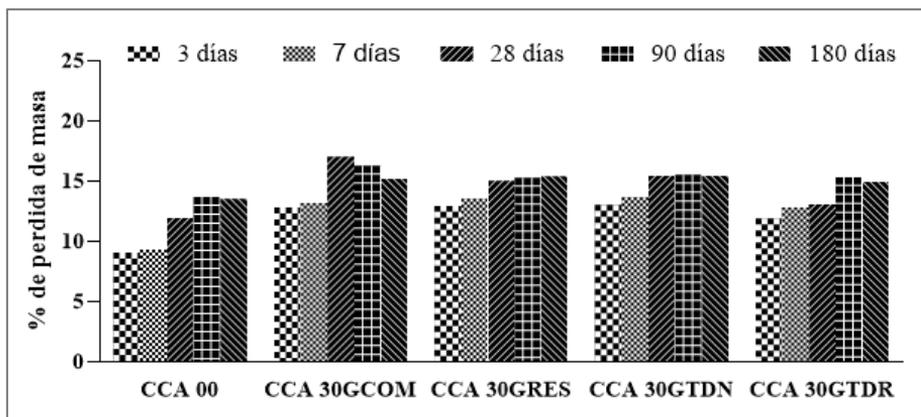


Figura 75 CCA- Porcentaje de pérdida de masa en el intervalo 35 - 600 °C

En estas pastas la pérdida de masa se debe principalmente al agua combinada de los hidratos de los SCH, es por ello que se tienen valores superiores en el intervalo 50 - 180 °C, aunque la pérdida de masa es continua y también se observan pérdidas de masa en el intervalo de 180 - 350 °C.

#### 4.2.1.3 Análisis Termogravimétrico de las pastas cal/CLD

Al igual como ocurriría con las pastas anteriores del FCC y la CCA, primeramente, identificamos los picos asociados para la pasta control (CLD 00). En la Figura 76 podemos observar la curva DTG a los 28 días de curado para la pasta control en un intervalo de temperatura de 35 a 600 °C, donde la pasta control presenta el pico 1 (100 - 180 °C) asociado a los geles SCH, el pico 2 corresponden a las deshidrataciones de los silicoaluminatos cálcicos hidratados (SACH), debido a que la ceniza de lodo de depuradora posee un contenido considerable de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> también se forman este tipo de productos, y finalmente está presente el

## PROPIEDADES QUÍMICAS

---

pico 4 (520 - 580 °C) que corresponde a la deshidroxilación de la portlandita (CH) y que como se puede apreciar no es visible para los 28 días de curado. Nuevamente en la pasta control no está presente el pico de la portlandita que, si tenía la pasta con FCC, en este caso la relación cal/CLD era de 1/3 por tanto se dispone de menos cal que es consumida en un menor tiempo por parte de la puzolana.

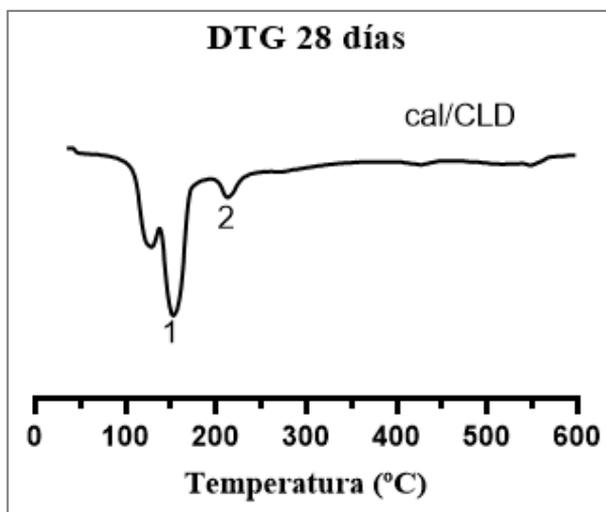


Figura 76 DTG para la pasta control cal/CLD

Zhao et al. [100] apuntan que se puede producir la formación de un fosfato de calcio hidratado cuando se hacen pastas cal/CLD. En nuestro caso no se ha observado la presencia de ese pico en la curva DTG, lo cual no quiere decir que no se haya formado, puede ocurrir su formación pero que no esté en la suficiente cantidad como para que se observe el pico en la curva DTG.

En presencia de sulfatos, las puzolanas que contiene fases con aluminio al reaccionar con la cal pueden dar lugar a la formación de etringita [134]. La pérdida de masa del agua asociada a la etringita también tiene lugar

en el intervalo entre 100 - 180 °C, con lo cual se solaparía con el pico del SCH en las pastas cal/CLD. Si observamos la Figura 76 junto al pico 1 aparece un pequeño hombro a menor temperatura., estos dos picos representarían los SCH y la etringita.

### **a. Pastas de cal/CLD geopolímero comercial**

En la Figura 77 se presenta la curva DTG para la pasta control, el 10 y 30 % de geopolímero con silicato sódico comercial, representada en un intervalo de temperatura de 35 a 600 °C.

En la pasta control, representada en línea discontinua, se puede observar que el pico 4 (CH) está presente hasta los 7 días de curado, también están presentes el pico 1 de los silicatos cálcicos hidratados solapado con el hombro a una temperatura ligeramente inferior, y el pico 2 atribuido a los ACH y SACH, los cuales a partir de los 28 días de curado ambos picos tienen mayor intensidad.

El pico 4 (CH) apenas es visible en la pasta CLD 10GCOM a los tres días de curado y en la pasta CLD 30GCOM este pico desaparece. Con la pasta CLD 10GCOM podemos observar los picos 1 (SCH-tringita), 2 (SACH-ACH) y 5 (NASH), mientras con la pasta CLD 30GCOM a parte de los picos 1, 2 y 5, se puede observar también un pico no apreciable hasta ahora y que está centrado alrededor de los 300 °C. La única referencia encontrada utilizando CLD y analizada por termogravimetría en presencia de cal es la ya comentada anteriormente de Zhao et al. [100] que atribuye ese pico a la presencia de un fosfato cálcico, llama la atención que no se haya observado dicho pico en la pasta control cal/CLD

y si se observe en la pasta con geopolímero, por lo que su presencia se puede deber a otro tipo de producto de reacción.

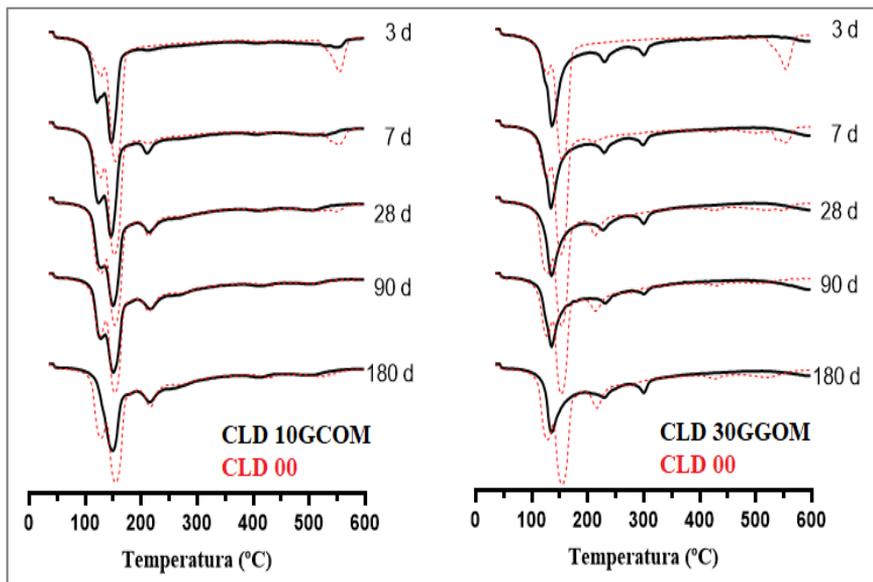


Figura 77 DTG para las pastas cal/CLD-geopolímero comercial

### b. Pastas de cal/CLD geopolímero a partir de CCA

En la Figura 78 podemos observar las curvas DTG para la pasta control, 10 y 30 % de geopolímero fabricadas a partir de la ceniza de cascara de arroz como fuente de sílice.

Tal y como se aprecia en dicha figura los productos de reacción son los mismos que los observados en las pastas activadas con el silicato comercial, nuevamente se observa la presencia del hombro atribuido a la etringita más visible en las pastas control y con el 10 % de geopolímero, pero no es observable en la que contiene el 30 %. Este comportamiento

es lógico puesto que a mayor porcentaje de geopolímero prevalece la reacción geopolimérica frente a la puzolánica.

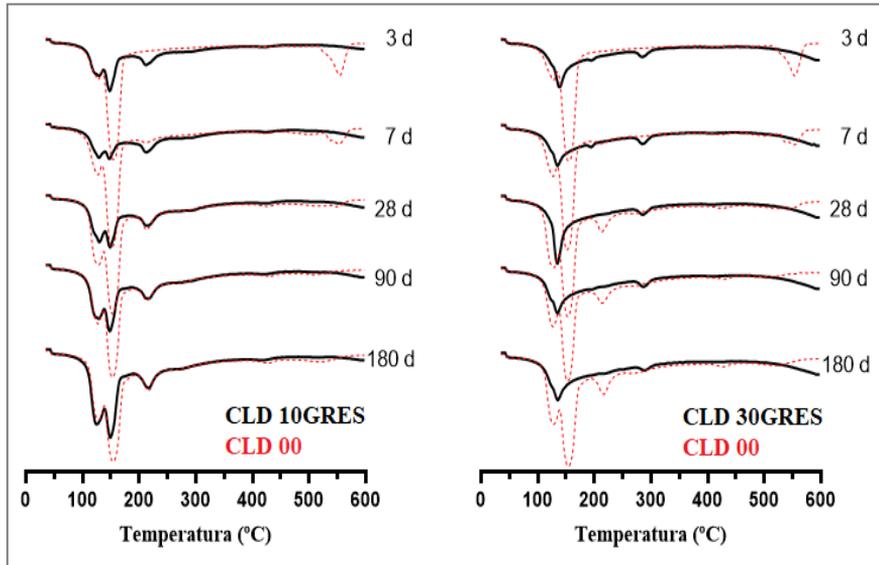


Figura 78 DTG para las pastas cal/CLD-geopolímero a partir de CCA.

En las pastas CLD 30GRES también es visible el pequeño pico formado alrededor de los 300 °C.

### c. Comparación de pastas cal/CLD y con geopolímero

Como se ha realizado anteriormente con las demás puzolanas en las Tablas 16, 17 y 18 aparecen respectivamente las pérdidas de masa de la pasta control CLD 00, la pasta CLD 30GCOM y la pasta CLD 30GRES.

## PROPIEDADES QUÍMICAS

Tabla 16 Pérdidas de masa en % de las pastas CLD 00 a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

<b>Días</b>	<b>50 - 180 °C</b>	<b>180 - 350 °C</b>	<b>500 - 600 °C</b>	<b>35 - 600 °C</b>
3	8,531	2,143	1,662	13,891
7	8,921	3,349	0,786	15,276
28	9,190	3,067	–	15,274
90	8,839	5,443	–	16,543
180	10,227	5,668	–	19,015

Tabla 17 Pérdidas de masa en % de las pastas CLD 30GCOM a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

<b>Días</b>	<b>50 - 180 °C</b>	<b>180 - 350 °C</b>	<b>500 - 600 °C</b>	<b>35 - 600 °C</b>
3	6,901	4,958	–	13,773
7	6,407	4,904	–	13,476
28	6,128	5,792	–	13,595
90	5,548	5,036	–	13,306
180	5,271	6,044	–	13,550

Tabla 18 Pérdidas de masa en % de las pastas CLD 30GRES a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado

<b>Días</b>	<b>50 - 180 °C</b>	<b>180 - 350 °C</b>	<b>500 - 600 °C</b>	<b>35 - 600 °C</b>
3	4,171	3,504	–	11,218
7	5,578	3,939	–	13,526
28	4,925	3,595	–	11,847
90	4,442	3,836	–	11,727
180	4,576	4,164	–	12,194

La pérdida de masa de la pasta control CLD 00 en el rango de la temperatura de 50 - 180 °C es la más alta observada de todas las pastas vistas anteriormente. Esta mayor pérdida de masa podría corroborar la

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

presencia de etringita en las pastas puesto que este producto de reacción tiene asociada 32 moléculas de agua. Al pasar a las muestras con geopolímero se vuelven a valores de pérdida de masa más similares a las anteriores puzolanas. La presencia de etringita en estas pastas no se puede descartar, pero como se ha venido indicando a mayores porcentajes de geopolímero mayor predominio de las reacciones geopoliméricas y por tanto mayor presencia de geles tipo NASH y C(N)ASH.

En la Figura 79 podemos observar que la pasta control CLD 00 tiene mayores pérdidas de masa que las activadas con las distintas fuentes de sílice tal como ya ocurría en el caso de utilizar la pasta con FCC como puzolana y además que las pérdidas de masa con el activador comercial son ligeramente superiores a los valores obtenidos por las pastas activadas con la CCA como fuente de sílice.

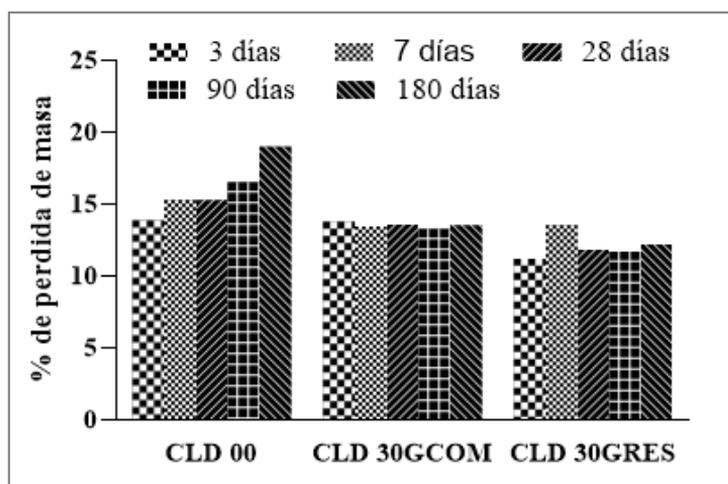


Figura 79 CLD- Porcentaje de pérdida de masa en el intervalo 35 - 600 °C

## PROPIEDADES QUÍMICAS

---

### **4.2.2 Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM).**

Se utiliza esta técnica para estudiar los productos de reacción formados durante las reacciones puzolánica y geopolimérica. Para este estudio solo consideramos el 30 % de sustitución tomadas a los 28 días de curado para todos los casos.

#### **4.2.2.1 FESEM para pastas con FCC como puzolana**

Continuando con el estudio de los productos de reacción formados en las pastas cal/puzolana y estas mismas con geopolímero, a continuación, se muestran unas micrografías de las pastas curadas a 28 días a temperatura ambiente.

##### **a. Pastas de cal/FCC y con geopolímero utilizando silicato comercial**

En la Figura 80 se muestran varias micrografías tanto de la pasta cal/FCC (FCC 00), como de la pasta que contiene el 30 % de geopolímero fabricado con el silicato comercial (FCC 30GCOM). Las micrografías a) y b) corresponden al control FCC 00. La micrografía a) está tomada a 5000 aumentos y en ella podemos observar la formación del gel tipo SCH que no tiene forma cristalina y en ella también se observan unos cristales laminares suelen asociarse a los ACH [135].

Para la pasta con el geopolímero (FCC 30GCOM), representadas en la Figura 80 como las micrografías c) y d), observamos las plaquetas

laminares y hexagonales agrupadas todas ellas que suelen representar a la gelenita hidratada. Payá et al. [54] encuentran este tipo de cristales en las pastas cal/FCC e indican que su tamaño se encuentra entre 5 y 10 micras. Como ya habíamos comentado en el apartado anterior de termogravimetría en la pasta con geopolímero coexisten las reacciones geopoliméricas y puzolánicas, es por ello, que la gelenita (GH) un producto de la reacción puzolánica también se observa en la micrografía c). La formación de los geles NASH y C(N)ASH resultado de la reacción de geopolimeración se observa en la micrografía d) tomada a 8000 aumentos [136]. En esa misma micrografía se observa la formación de unos pequeños cristales que pueden tratarse de fases zeolíticas (Z) [137].

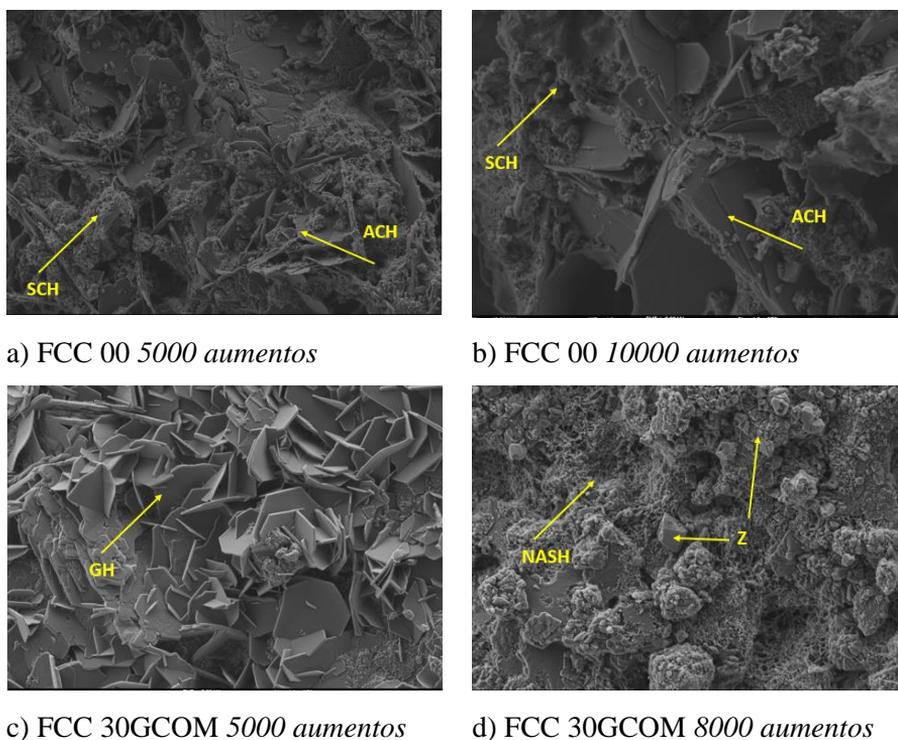


Figura 80 Micrografías de las pastas FCC 00 y FCC 30GCOM a los 28 días de curado

## PROPIEDADES QUÍMICAS

---

La formación de fases zeolíticas en la reacción geopolimérica del FCC activado por álcalis ha sido corroborada por otros autores como Trochez et al. [57] y Rodríguez et al. [58].

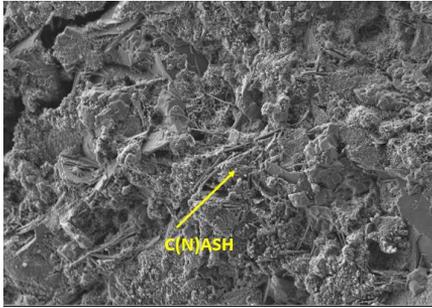
### **b. Pastas de cal /FCC con geopolímeros fabricados con fuentes de sílice alternativa.**

En la Figura 81 se muestran las micrografías de las pastas con un 30 % de geopolímero pero fabricadas con fuentes de sílice alternativas al silicato sódico comercial. Las micrografías a) y b) representan a las pastas activadas con la CCA, como se muestra en la micrografía a) se forman geles tipo C(N)ASH, la composición se ha corroborado mediante análisis EDS. La composición realizada haciendo análisis en varios puntos con la misma morfología muestra una composición media con un 6,9 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 25,7 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 31,6 % de  $\text{SiO}_2$  y un 35,7 % de  $\text{CaO}$ . En la micrografía b) se observa también la formación de productos zeolíticos tal y como ocurría en la pasta activada con el silicato comercial.

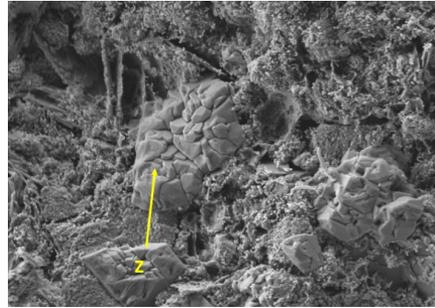
En las micrografías c) y d) se muestran las pastas FCC 30GTDN, como se puede observar en las mismas los productos de reacción son los mismos que las pastas activadas con geopolímero fabricado con silicato comercial y con CCA. Se puede observar la formación de zeolitas y de productos como los geles C(N)ASH. Estos geles son más densos que los SCH. En la micrografía c) se observa la presencia de cristales planos atribuidos a los ACH.

Por último, en las micrografías e) y f) se muestran los productos de reacción de la pasta que contiene el 30 % de geopolímero fabricado con tierra diatomea residual como fuente de sílice. En las pastas fabricadas

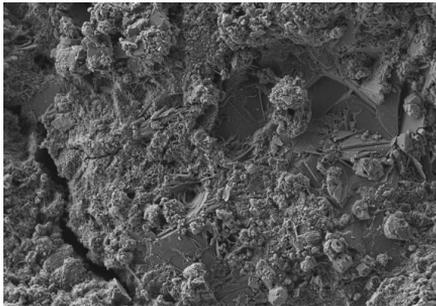
coexisten productos de la reacción geopolimérica y de la puzolánica, tal y como se observa en la micrografía f) donde aparecen cristales tipo CAH y el gel C(N)ASH.



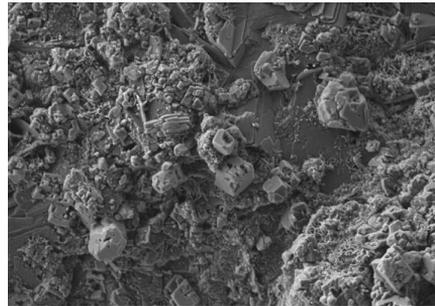
a) FCC 30GRES 4000 aumentos



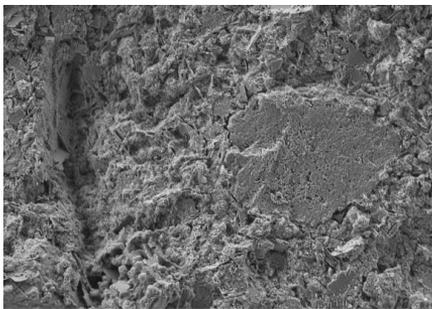
b) FCC 30GRES 8000 aumentos



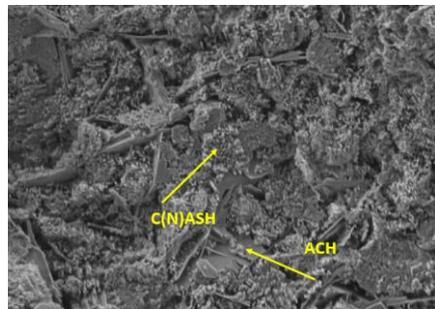
c) FCC 30GTDN 4000 aumentos



d) FCC 30GTDN 8000 aumentos



e) FCC 30GTDR 3000 aumentos



f) FCC 30GTDR 8000 aumentos

Figura 81 Micrografías de las pastas FCC 30GRES, FCC 30GTDN y FCC 30GTDR a los 28 días de curado

## PROPIEDADES QUÍMICAS

---

Para finalizar este apartado debemos indicar que las observaciones de los productos formados por FESEM confirman las fases encontradas en los análisis termogravimétricos para todas las pastas cal/FCC y sus respectivas pastas con geopolímero con sus diferentes fuentes de sílice.

### **4.2.2.2 FESEM para pastas con CCA como puzolana**

En este apartado se representan las pastas que contienen a la CCA como puzolana en una relación del doble frente a la cantidad de cal y utilizando un 30 % de sustitución de dicha pasta cal/CCA por un geopolímero que utiliza como precursor al FCC y activado mediante fuente de sílice comercial y fuentes alternativas.

#### **a. Pastas de cal/CCA y con geopolímero utilizando silicato comercial**

En la Figura 82 a) y b) podemos observar que para la pasta control cal/CCA (CCA 00) el producto principal es una estructura amorfa que se asocia a la formación de los SCH. Mediante la termogravimetría de esta pasta se concluyó que el principal producto formado en este tipo de mezclas es el silicato cálcico hidratado. Aparte de esta fase, Billong et al. [69] informan de la propagación de micro grietas en la matriz cal/CCA característica del producto de reacción inestable. Pavía et al. [70] evidenció mediante SEM la alta reactividad de la CCA, confirmando que la reacción puzolánica ya había comenzado a 1 día de curado con pequeños hidratos en forma de aguja, aumentando progresivamente en tamaño y cantidad (a los 3 y 7 días) y uniéndose entre sí, formando redes

continuas a lo largo de la pasta después de 14 días de curado. En el caso de la micrografía b) se observa la formación de unos cristales alargados que pueden atribuirse a la formación de calcita (C) derivada de la carbonatación de la cal [138].

Las micrografías c) y d) representan a la pasta CCA 30GCOM y en ella observamos la presencia del gel geopolimérico, la micrografía d) es una ampliación de la c). En ella se muestra que este gel es muy compacto.

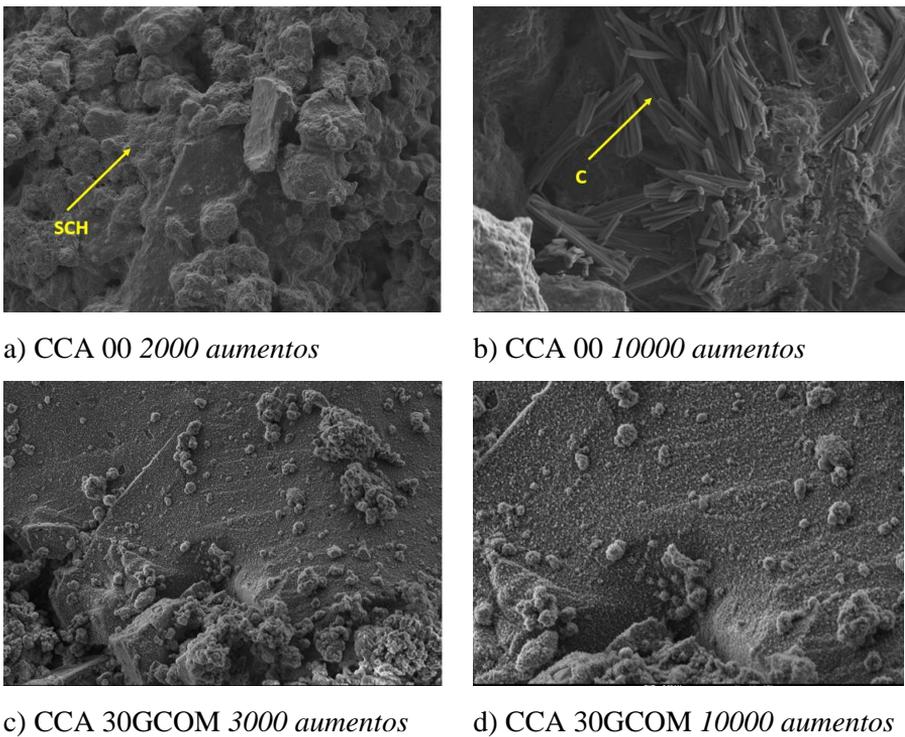
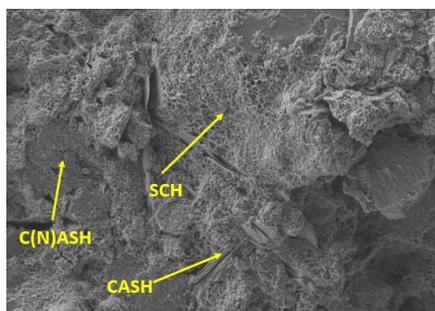


Figura 82 Micrografías de las pastas CCA 00 y CCA 30GCOM a los 28 días de curado

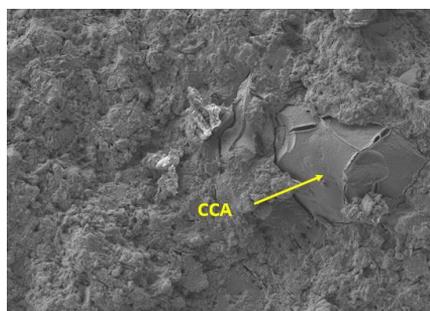
### **b. Pastas de cal/CCA con geopolímeros fabricados con fuentes de sílice alternativa.**

## PROPIEDADES QUÍMICAS

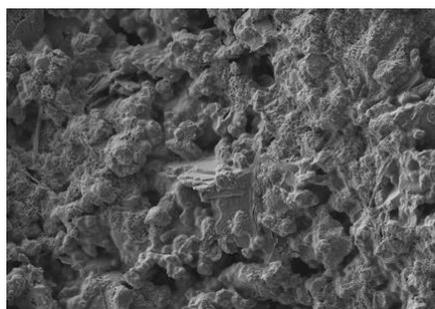
En la Figura 83 se agrupan las micrografías de las pastas cal/CCA con sustitución de un 30 % de la misma por el geopolímero fabricado con las fuentes de sílice alternativas.



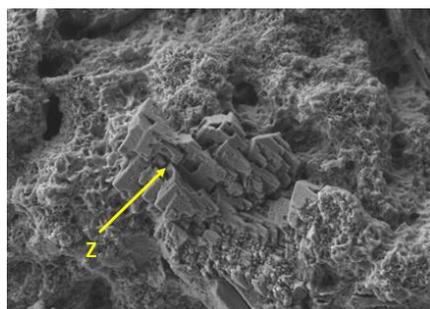
a) CCA 30GRES 5000 aumentos



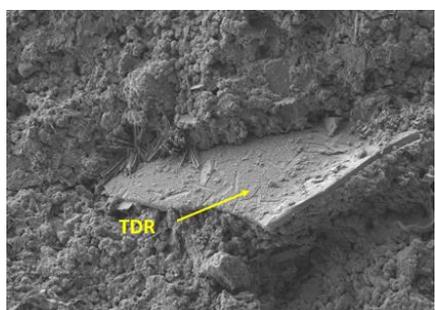
b) CCA 30GRES 1000 aumentos



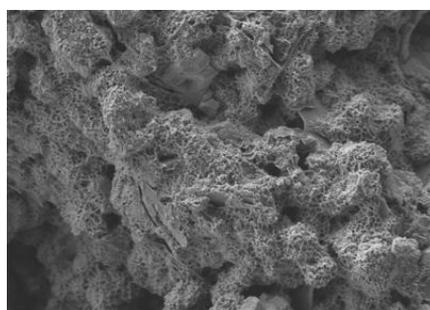
c) CCA 30GTDN 3000 aumentos



d) CCA 30GTDN 10000 aumentos



e) CCA 30GTDR 1000 aumentos



f) CCA 30GTDR 5000 aumentos

Figura 83 Micrografías de las pastas CCA 30GRES, CCA 30GTDN y CCA 30GTDR a los 28 días de curado

Las micrografías a) y b) representan a la pasta con el 30% de geopolímero fabricada con la CCA como fuente de sílice. En ella se observan tanto productos puzolánicos (SCH y CASH) como geopoliméricos (C(N)ASH). La composición de los mismos se ha corroborado por EDS. En la micrografía b) aparece una partícula de CCA sin reaccionar rodeada de productos de reacción.

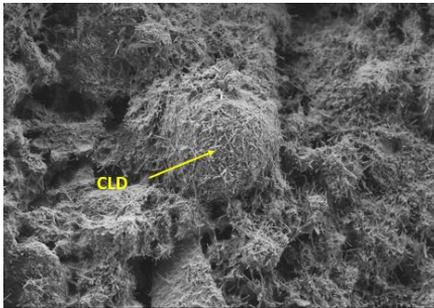
Las micrografías c) y d) representan a la pasta con la fuente de sílice que utiliza a la tierra diatomea natural y en ella se observan productos ya comentados como es el caso de la formación de zeolitas. Cuando se utiliza la tierra diatomea residual [micrografías e) y f)] se observa como ocurría en la micrografía b) una partícula sin reaccionar, pero en este caso de tierra diatomea residual.

### **4.2.2.3 FESEM para pastas con CLD como puzolana**

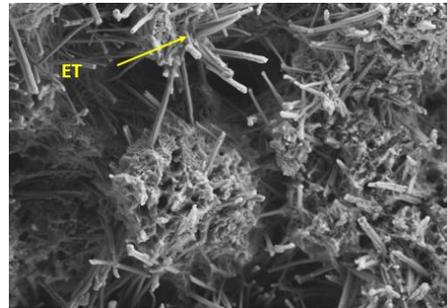
Para finalizar el apartado de microscopía se realiza el estudio de las pastas que contienen CLD como puzolana. En este caso solamente se utilizan dos fuentes de sílice, el silicato comercial y la CCA. En la Figura 84 se muestran las micrografías de todas las pastas. Las micrografías de la pasta control cal/CLD (CLD 00) son la a) y b). En la micrografía a) se muestra una partícula esférica de CLD totalmente rodeada de productos de reacción y en la micrografía b) se muestra la formación de agujas de etringita (ET). En el apartado de termogravimetría ya se comentó la posibilidad de formación de este producto debido a la presencia de sulfatos en la CLD.

## PROPIEDADES QUÍMICAS

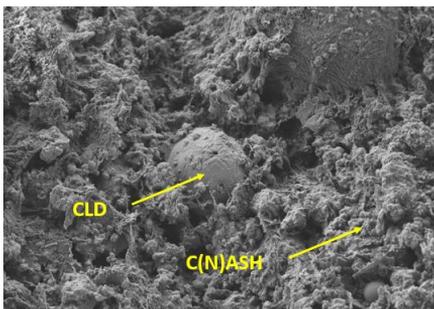
En las micrografías c) y d) se muestran las pastas con 30 % de geopolímero fabricado con el silicato comercial. En ellas se ve que se forma el gel tipo C(N)ASH y productos cristalinos como las zeolitas.



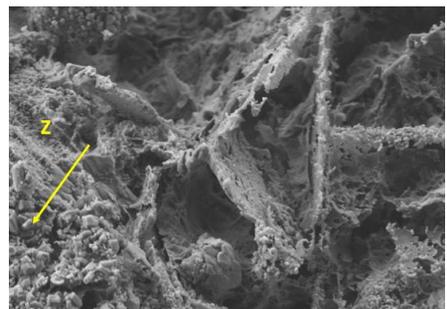
a) CLD 00 2000 aumentos



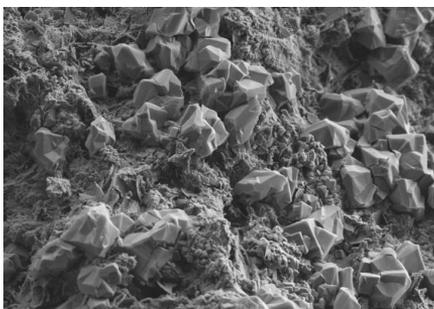
b) CLD 00 10000 aumentos



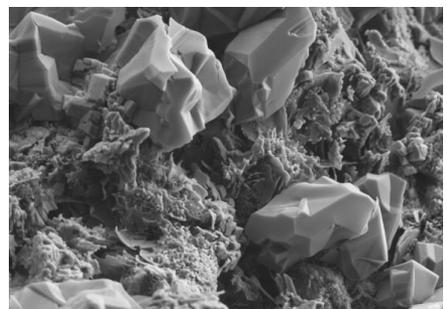
c) CLD 30GCOM 1000 aumentos



d) CLD 30GCOM 10000 aumentos



e) CLD 30GRES 4000 aumentos



f) CLD 30GRES 10000 aumentos

Figura 84 SEM para CLD 00, CLD 30GCOM y CLD 30GRES

Finalmente, en las micrografías e) y f) se muestran las pastas fabricadas con la CCA como fuente de sílice, en ellas aparece la formación de unos productos cristalinos que, aunque pudieran parecer zeolitas al realizar el análisis por EDS aparece la presencia del fósforo por lo que puede tratarse de los cristales de fosfato de calcio hidratado que comentaban Zhou et al [99] que se formaban al utilizar pastas de cal con CLD. Además, los tamaños de los cristales son mucho mayor que las fases zeolíticas observadas anteriormente en otras pastas. Estos cristales son fácilmente observables a 4000 aumentos en la micrografía e).

## PROPIEDADES FÍSICAS

---

### 4.3 Propiedades físicas de los morteros mixtos

En este apartado en primer lugar, describiremos el ensayo de consistencia por el método de la mesa de sacudidas siendo esta una propiedad en estado fresco que define la manejabilidad o trabajabilidad del mismo, lo que supondría una aproximación a su puesta en obra. En segundo lugar, describiremos algunas características del mortero en estado endurecido para cumplimiento de las exigencias normativas y reglamentarias, estos ensayos considerados son: la resistencia mecánica, la absorción de agua por capilaridad y el comportamiento frente a los ciclos hielo deshielo.

Para su identificación se utiliza la misma codificación utilizada anteriormente para las pastas donde, primero describe el tipo de puzolana, seguido por el % de sustitución de los distintos geopolímeros propuestos. Por ejemplo, CLD 30GCOM significa que tenemos un mortero donde un 70 % de binder es la mezcla cal/ceniza de lodo de depuradora y un 30 % es el geopolímero comercial.

Al tratarse de 3 puzolanas empezaremos por los morteros cal/FCC, seguido por los morteros cal/CCA y los morteros cal/CLD, cada uno de ellos con sus diferentes geopolímeros propuestos. Posteriormente se compara el comportamiento de los diferentes geopolímeros propuestos según el tipo de mezcla cal/puzolana utilizada para ver las diferencias de las misma sobre la resistencia a la compresión.

#### 4.3.1 Consistencia de los morteros por el método de la mesa de sacudidas

La consistencia adecuada se consigue mediante la adición de cierta cantidad de agua que varía en función de la granulometría y composición del mortero. Debemos recordar que la relación agua/conglomerante es un factor principal tanto en estado fresco, en estado fresco porque permite que la mezcla pueda ser manejada con facilidad sin segregación, y en estado endurecido, porque determinará su resistencia a una determinada edad, y también influirá en su durabilidad frente a los diferentes agentes agresivos. Algunos autores indican que a menor relación agua/conglomerante, mayor será la resistencia obtenida, incluso se recomienda hacer el uso de algunos aditivos para mejorar ciertas propiedades en los morteros y hormigones para reducir la cantidad de agua.

En el caso de los morteros de cal, este material tiene gran afección por el agua y hace que las relaciones agua/conglomerante deba ser más altas que en el caso de los cementos. Si a esto unimos que las puzolanas suelen ser materiales finamente molidos y con alta superficie específica, el resultado es que los morteros cal/puzolana suelen tener valores de dicho parámetro superiores a 0,6.

La norma UNE-EN 459-2 [139] en función al tipo de cal utilizada para la construcción recomienda un diámetro requerido de escurrimiento de  $165 \pm 3$  a  $185 \pm 3$  mm obtenido mediante la mesa de sacudidas. Para los morteros de albañilería se considera una consistencia normal cuando el diámetro es de  $140 \pm 10$  mm.

Para este ensayo solo se considera los morteros controles y los morteros con el 30 % de sustitución en peso de los geopolímeros propuestos por la mezcla cal/puzolana. La relación agua/binder escogida fue de 0,8. elegida

## PROPIEDADES FÍSICAS

---

principalmente por la puzolana FCC, siendo esta la que requiere mayor cantidad de agua para su hidratación.

En la Tabla 19 podemos observar los valores (media aritmética de 4 ensayos) para el escurrimiento de los morteros estudiados con las distintas puzolanas, donde el mortero control FCC 00 (152,8 mm) tiene un menor diámetro de escurrimiento que los morteros control CCA 00 (209,0 mm) y CLD 00 (182,5 mm). Los morteros controles FCC 00 y CLD 00 pueden considerarse como morteros plásticos según las recomendaciones para las propiedades de los morteros de albañilería, que mencionan que los morteros plásticos tienen un diámetro de escurrimiento de 140 a 200 mm [140].

Tabla 19 Índice de escurrimiento para los diferentes morteros mixtos.

<b>Matrices</b>	<b>Escurrecimiento [mm] ± Desv. Est.</b>
FCC 00	152,8 ± 2,5
FCC 30GCOM	131,8 ± 3,5
FCC 30GRES	111,8 ± 3,5
FCC 30GTDN	119,3 ± 2,7
FCC 30GTDR	114,3 ± 2,3
CCA 00	209,0 ± 2,2
CCA 30GCOM	178,0 ± 2,5
CCA 30GRES	126,5 ± 3,6
CCA 30GTDN	126,0 ± 3,1
CCA 30GTDR	124,2 ± 2,4
CLD 00	182,5 ± 2,9
CLD 30GCOM	124,5 ± 1,2
CLD 30GRES	121,7 ± 2,7

Así mismo, se observa que independientemente de la puzolana y del tipo de geopolímero utilizado, la incorporación del geopolímero en estas matrices cal/puzolana reduce el diámetro de escurrimiento, respecto de los morteros controles y al tener valores inferiores a 140 mm, podemos indicar que se trata de una consistencia seca.

La trabajabilidad del mortero que contiene el geopolímero fabricado con el silicato comercial es superior a sus homólogos fabricados con fuentes de sílice alternativa. Este comportamiento es lógico puesto que como ya hemos indicado anteriormente no toda la fuente de sílice del activador es disuelta y parte del material rico en silicio queda como fracción semi-sólida dentro el activador y por tanto podría producirse un efecto negativo en la absorción de agua.

En el caso de los otros controles CCA 00 y CLD 00 al cambiar parte del binder por el FCC que es un material que absorbe mucha agua también queda justificada la reducción de la trabajabilidad.

Arizzi y Cultrone [55], menciona que a mayor porcentaje de sustitución de FCC (10, 15, 20 %) por la cal, se necesita mayor la cantidad de agua para la hidratación y la CCA requiere menor demanda de agua en los morteros de cal según el estudio de Pavía et al. [70].

Todos los datos obtenidos concuerdan con investigaciones que señalaron que, en puzolanas, la superficie específica tiene una influencia mucho mayor en demanda de agua que el tamaño de partícula o la relación cal/puzolana [72].

## PROPIEDADES FÍSICAS

---

En la Figura 85 podemos observar el diámetro de escurrimiento para los tres morteros controles utilizando las diferentes puzolanas, donde se evidencia que el FCC 00 posee un menor diámetro que el CCA 00 y CLD 00. El cambio de color debido al uso de los tres tipos de puzolana puede ser favorable desde un punto de vista estético si se emplea como morteros de revoque en una fachada.



Figura 85 Diámetro de escurrimiento de las tres puzolanas control

### 4.3.2 Resistencia a la compresión de los morteros cal/FCC con sustituciones por geopolímero

Para todos los morteros cal/puzolana la relación agua/binder fue de 0,8 y la relación de agua árido/binder fue de 1/3. La dosificación del geopolímero utiliza siempre al FCC como precursor y varía la fuente de sílice utilizada en el activador. Su dosificación se escogió tomando como referencia trabajos previos del grupo de investigación, más concretamente fue la utilizada a partir de los estudios de Bouzón et al. [38], en la que se emplea una relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  con un valor de 1,17 y una relación agua/FCC de 0,6.

La relación cal/binder para estos morteros cal/FCC es de 1/1 en todos los casos. Primero se describe los morteros con sustituciones de cal/FCC por geopolímero, este último fabricado con silicato comercial seguidos por las sustituciones de los reactivos químicos comerciales por activadores alternativos.

### 4.3.2.1 Mezclas cal/FCC con sustituciones por geopolímero comercial (FCC GCOM)

En la siguiente Tabla 20 se observa las condiciones experimentales para las mezclas de los morteros cal/FCC.

Tabla 20 Dosificación en gramos para los morteros mixtos cal/FCC-geopolímero comercial

Relación 1/1	Cal/puzolana [g]			Geopolimero [g]				Arena [g]
	Cal	FCC	H <sub>2</sub> O	FCC	Activator			
					H <sub>2</sub> O	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	
<b>FCC00</b>	262,5	262,5	420,0	-	-	-	-	1575,0
<b>FCC 10GCOM</b>	236,3	236,3	378,0	52,5	12,6	6,4	29,5	1575,0
<b>FCC 20GCOM</b>	210,0	210,0	336,0	105,0	25,2	12,8	59,1	1575,0
<b>FCC 30GCOM</b>	183,8	183,8	294,0	157,5	37,8	19,2	88,6	1575,0
<b>FCC 40GCOM</b>	157,5	157,5	252,0	210,0	50,4	25,6	118,1	1575,0
<b>FCC 50GCOM</b>	131,3	131,3	210,0	262,5	63,0	32,0	147,7	1575,0

En la Figura 86 se representa la resistencia a compresión de los cubos de mortero para todas las dosificaciones anteriormente señaladas en la Tabla 20 desde 1 día de curado hasta los 360 días. En dicha figura podemos observar un incremento de la resistencia a la compresión a medida que avanza el tiempo de curado para todos los porcentajes de sustitución de

## PROPIEDADES FÍSICAS

---

geopolímero formado de silicato sódico comercial e hidróxido de sodio y para el mortero control cal/FCC también se observa un crecimiento progresivo de las resistencias a compresión.

A un día de curado solo el mortero con el 10 % de geopolímero (FCC 10GCOM) y el mortero control obtienen resistencias menores a 5 MPa, el resto ya superan dicho valor. Este dato es muy relevante puesto que si un punto débil tiene los morteros de cal/puzolana es el hecho de desarrollar resistencias muy bajas en los primeros días de curado. Con la adición del geopolímero estaríamos favoreciendo el desarrollo temprano de resistencias. Si bien este porcentaje del 10 % de geopolímero presenta valores inferiores en edades cortas, al llegar a las edades largas presenta resistencias próximas a los que tienen un 20 o 30 % de sustitución de geopolímero por la mezcla de cal/FCC.

Se observa que con el 40 % de geopolímero (FCC 40GCOM) se obtiene las mayores resistencias a compresión, y que a 1 día de curado se obtiene 15 MPa un valor similar al que obtenemos para el mortero control (FCC 00) a los 180 días de curado. Con este porcentaje de sustitución se llega a obtener hasta 25 MPa desde los siete días de curado, manteniendo ese valor constante hasta el último día del ensayo.

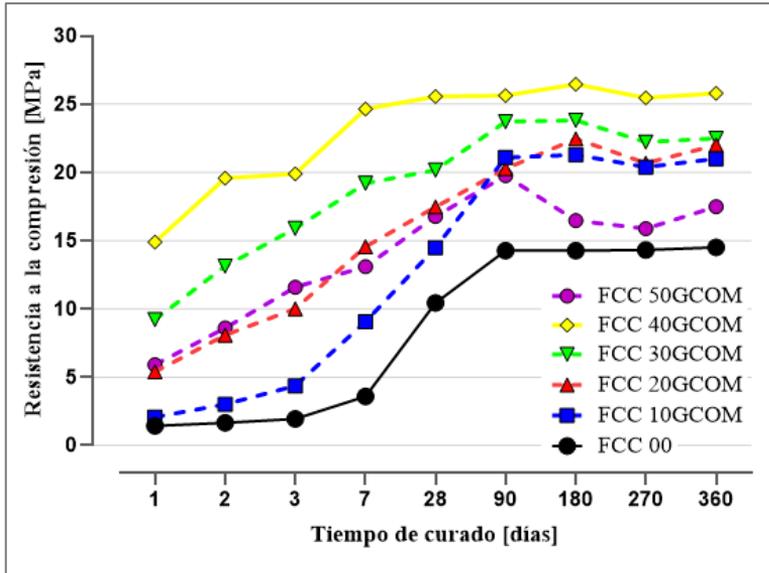


Figura 86 Rc de los morteros cal/FCC geopolímero comercial

Es reseñable el comportamiento del mortero con la sustitución del 50 % de la mezcla cal/FCC por geopolímero. Se ha observado que a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución de la mezcla de cal/FCC aumentaban las resistencias, pero al llegar al 50 % las resistencias disminuyen. Cabe indicar que estas muestras tenían una baja trabajabilidad y al ser compactadas existen problemas de fluidez que hace que se produzca una mezcla menos homogénea y con posibles huecos debidos a una mala compactación.

Es interesante también el comportamiento de la mezcla con un 30 % de geopolímero que, si bien en los primeros 28 días de curado presenta resistencias a compresión con 5 MPa por debajo de los obtenidos por el mortero con un 40 % de geopolímero, al aumentar la edad de curado obtiene resistencias muy cercanas a este último.

## PROPIEDADES FÍSICAS

---

La incorporación del geopolímero a la mezcla de cal/puzolana da lugar a la formación de nuevos productos de reacción. Como ya se comentó en el apartado de microestructura la formación del gel tipo C(N)ASH parece confirmarse en estas mezclas mixtas, y probablemente la formación de este producto sea el responsable de una mayor resistencia mecánica.

Las mejoras en las resistencias a compresión sobre todo a edades cortas de curado confirman que la incorporación del calcio por parte de la cal mejora las prestaciones de la mezcla. La sinergia en los productos híbridos ha sido estudiada por otros autores, así se ha demostrado los buenos resultados obtenidos por mezclas activadas que contienen cemento portland y ceniza volante [133].

### **4.3.2.2 Mezclas cal/FFC con sustituciones por geopolímero a partir de CCA (FCC GRES)**

En la Tabla 21 podemos observar las dosificaciones para estos morteros mixtos donde la diferencia con los anteriores radica en que el activador ha sido fabricado con la CCA como fuente de sílice. Recordar que la disolución del activador se ha preparado con un termo donde el agua, la CCA y el NaOH permanecen en el mismo durante 24 horas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 21 Dosificación en gramos para los morteros mixtos cal/FCC-geopolímero a partir de CCA

Relación I/I	Cal/puzolana [g]			Geopolímero [g]				Arena [g]
	Cal	FCC	H <sub>2</sub> O	FCC	Activator H <sub>2</sub> O	NaOH	CCA	
<b>FCC 00</b>	262,5	262,5	420,0	-	-	-	-	1575,0
<b>FCC 10GRES</b>	236,3	236,3	378,0	52,5	31,5	12,6	9,2	1575,0
<b>FCC 20GRES</b>	210,0	210,0	336,0	105,0	63,0	25,2	18,4	1575,0
<b>FCC 30GRES</b>	183,8	183,8	294,0	157,5	94,5	37,8	27,6	1575,0
<b>FCC 40GRES</b>	157,5	157,5	252,0	210,0	126,0	50,4	36,8	1575,0
<b>FCC 50GRES</b>	131,3	131,3	210,0	262,5	157,5	63,0	45,9	1575,0

En la Figura 87 se representa la resistencia a compresión de los cubos a medida que aumenta la edad de curado, en ella podemos observar que a un día de curado los porcentajes de sustitución 10 y 50 % de geopolímero obtienen valores inferiores a 5 MPa, pero conforme pasa el tiempo de curado las resistencias incrementan con valores superiores a los 20 MPa, valores similares a los obtenidos con los porcentajes de 20 y 40 % de geopolímero.

Es con el 30 % de sustitución de geopolímero residual con la que se obtiene las mayores resistencias a la compresión, consiguiendo en un día de curado los 15 MPa resistencia similar a la que obtiene el mortero control a los 180 días de curado.

También se puede observar que existen diferencias entre las resistencias en todos los porcentajes de sustitución de geopolímero en las primeras edades muy cortas de curado, pero en las edades largas esta diferencia de resistencia a la compresión es mínima. Así mismo todos los morteros que tienen geopolímero a partir de los 7 días de curado tienen una resistencia similar a la del mortero control alcanzada en edades largas de curado.

## PROPIEDADES FÍSICAS

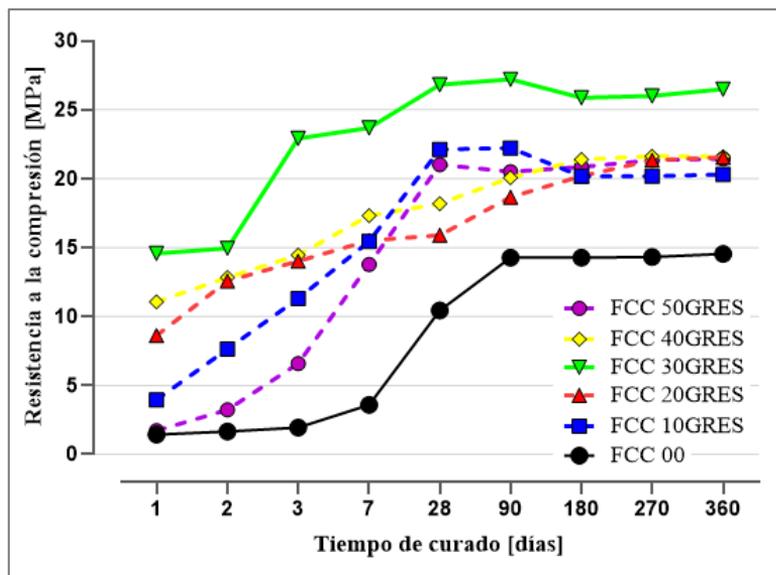


Figura 87 R<sub>c</sub> de los morteros cal/FCC geopolímero a partir de CCA

Es reseñable destacar que para el mortero fabricado con el silicato comercial la mezcla que obtenía siempre mayores resistencias a compresión era la que contenía un 40 % de geopolímero comercial, pero con el geopolímero obtenido a partir de CCA se necesita sustituciones del 30 % para obtener la misma resistencia (25 MPa).

Si bien para estos morteros con altos porcentajes de geopolímero (40 - 50 %) la adición del geopolímero fabricado con CCA no se ha visto favorecido, si lo ha hecho en el caso de las mezclas con menores porcentajes de geopolímero, sobre todo para el mortero FCC 10GRES. Este buen comportamiento por parte de la CCA puede resultar de una mejora en la conectividad en la microestructura de las muestras activadas con este tipo de silicato alternativo. Datos similares fueron obtenidos por Villaquirán-Caicedo en el artículo publicado en 2019 donde también utilizaba la CCA como silicato alternativo [141].

**4.3.2.3 Mezclas cal/FCC con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea natural (FCC GTDN)**

En la Tabla 22 podemos observar las dosificaciones para estos morteros fabricados a partir de la tierra diatomea natural como fuente de sílice en la fabricación del activador .

Tabla 22 Dosificación en gramos para los morteros mixtos cal/FCC-geopolímero a partir de TDN

Relación 1/1	Cal/puzolana [g]			Geopolímero [g]				Arena [g]
	Cal	FCC	H <sub>2</sub> O	FCC	Activador			
					H <sub>2</sub> O	NaOH	TDN	
<b>FCC 00</b>	262,5	262,5	420,0	-	-	-	-	1575,0
<b>FCC 10GTDN</b>	236,3	236,3	378,0	52,5	31,5	12,6	9,2	1575,0
<b>FCC 20GTDN</b>	210,0	210,0	336,0	105,0	63,0	25,2	18,4	1575,0
<b>FCC 30GTDN</b>	183,8	183,8	294,0	157,5	94,5	37,8	27,6	1575,0
<b>FCC 40GTDN</b>	157,5	157,5	252,0	210,0	126,0	50,4	36,8	1575,0
<b>FCC 50GTDN</b>	131,3	131,3	210,0	262,5	157,5	63,0	45,9	1575,0

En la Figura 88 podemos observar la gráfica de la resistencia a la compresión para los morteros con el geopolímero utilizando como activador las tierras diatomeas procedente de Guatemala.

En este caso, la influencia del 50 % de sustitución de geopolímero sobre la resistencia es mínima respecto del mortero control, teniendo solamente una mejoría respecto a este último para la edad de curado de 7 días, en el resto de edades de curado las resistencias de los morteros FCC 00 y FCC 50GTDN son prácticamente las mismas. Los problemas de trabajabilidad de esta última mezcla parecen ser los responsables de su mal comportamiento mecánico.

## PROPIEDADES FÍSICAS

Como ya ocurría en los morteros previamente ensayados con el porcentaje de un 10 % de sustitución de mezcla cal/FCC por geopolímero a media que se incrementa la edad de curado va ganando más resistencia y si bien en las primeras edades de curado no se observan los beneficios de su uso, pasados los 90 días de curado alcanza valores de resistencia a la compresión similares o incluso mayores que los porcentajes de sustitución del 30 y del 40 %.

La mayor resistencia obtenida por un mortero activado con TDN se obtiene para el mortero con el 20 % de geopolímero llegando hasta los 27 MPa a los 360 días de curado, pero en edades muy cortas de curado este porcentaje tiene valores menores respecto de los geopolímeros con 30 y 40 % de sustitución.

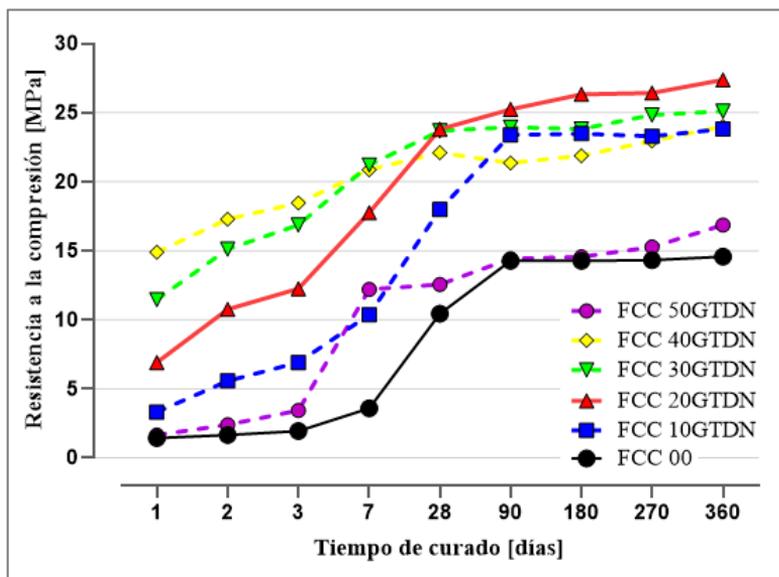


Figura 88 Rc de los morteros cal/FCC geopolímero a partir de TDN

**4.3.2.4 Mezclas cal/FCC con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea residual (FCC GTDR)**

Por último, en la Tabla 23 podemos observar la dosificación para estos morteros mixtos activados utilizando como fuente de sílice alternativa la tierra diatomea residual procedente de la fabricación de cerveza Heineken.

Tabla 23 Dosificación en gramos para los morteros mixtos cal/FCC-geopolímero a partir de TDR

Relación l/1	Cal/puzolana			Geopolímero				Arena
	Cal	FCC	H <sub>2</sub> O	FCC	H <sub>2</sub> O	Activator NaOH	TDR	
<b>FCC 00</b>	262,5	262,5	420,0	-	-	-	-	1575,0
<b>FCC 10GTDR</b>	236,3	236,3	378,0	52,5	31,5	12,6	9,2	1575,0
<b>FCC 20GTDR</b>	210,0	210,0	336,0	105,0	63,0	25,2	18,4	1575,0
<b>FCC 30GTDR</b>	183,8	183,8	294,0	157,5	94,5	37,8	27,6	1575,0
<b>FCC 40GTDR</b>	157,5	157,5	252,0	210,0	126,0	50,4	36,8	1575,0
<b>FCC 50GTDR</b>	131,3	131,3	210,0	262,5	157,5	63,0	45,9	1575,0

En la Figura 89 se muestran los resultados de resistencia a compresión de todos los morteros activados con la tierra diatomea residual para todas las edades de curado ensayadas. En la misma, podemos observar que, con los porcentajes de 20, 30 y 40 % de geopolímero a un día de curado se tiene valores superiores a 5 MPa como ya sucedía con los morteros activados con el silicato comercial. También se observa que con estos porcentajes a tiempos largos de curado no existe mucha diferencia en los valores de resistencia a la compresión entre las distintas series, uniéndose a ellos los

## PROPIEDADES FÍSICAS

valores de resistencia del mortero activado con un 10 % de sustitución de la mezcla cal/puzolana por geopolímero.

Con un 50 % de sustitución por geopolímero activado con tierra diatomea solo en edades cortas de curado podemos observar un leve incremento de resistencia con respecto al mortero control, pero no es así en tiempos de curado más largos donde tiene un comportamiento similar o inferior.

Los morteros fabricados con la tierra diatomea residual no logra superar en ningún caso los 25 MPa de resistencia a compresión, valor que si era superado por sus homólogos fabricados con otras fuentes de sílice. Estos resultados son lógicos si tenemos en cuenta que es el material residual del filtrado de la cerveza y existe la posibilidad de presencia de materia orgánica y está última puede hacer que su desempeño se vea comprometido.

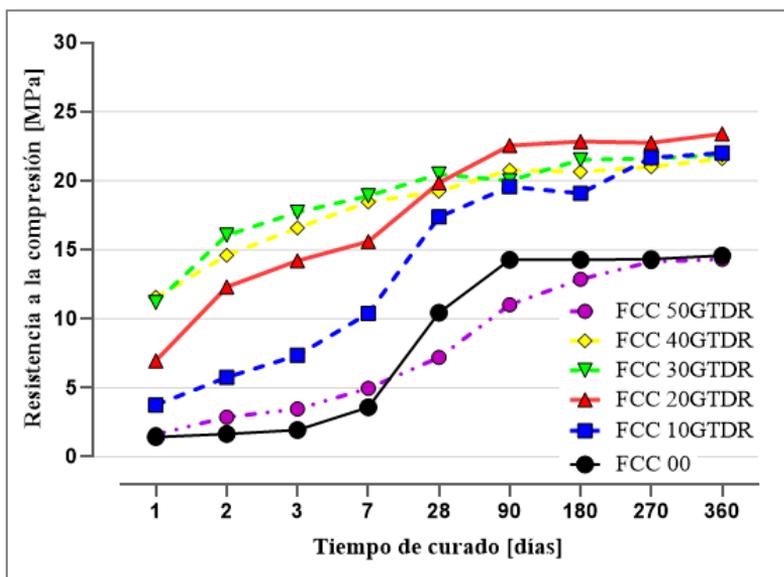


Figura 89 Rc de los morteros cal/FCC geopolímero a partir de TDR

### 4.3.2.5 Discusión de los morteros cal/FCC con los distintos tipos de geopolímero

Si comparamos los resultados podemos indicar que algunos de los mejores resultados en la resistencia a la compresión se dan dentro el rango del 20 y el 40 % de sustitución en peso de la mezcla cal/FCC por geopolímero fabricado utilizando el FCC como precursor y activador el silicato comercial o con diferentes fuentes de sílice alternativas.

En la Figura 90 se ha representado el 30 % de sustitución para los cuatro geopolímeros propuestos puesto que aunque no es el mortero que obtiene siempre el mejor desempeño mecánico pero representa un porcentaje intermedio dentro el rango de estudio. En la misma podemos observar, que el 30 % del geopolímero generado a partir de CCA presenta el mejor comportamiento respecto de los demás geopolímeros para todas las edades de curado analizadas. Los 3 geopolímeros alternativos propuestos tienen igual o mejor comportamiento que el geopolímero comercial, siendo estos resultados de gran beneficio medioambiental debido que podemos evitar el uso del silicato sódico comercial al elaborar el geopolímero.

Todos los morteros que tienen geopolímero independientemente de su naturaleza incrementa la resistencia a primeras edades de curado, llegando hasta los 20 y 25 MPa en tiempos largos de curado, cuyos valores son superiores con 5 o 10 MPa respecto del mortero control.

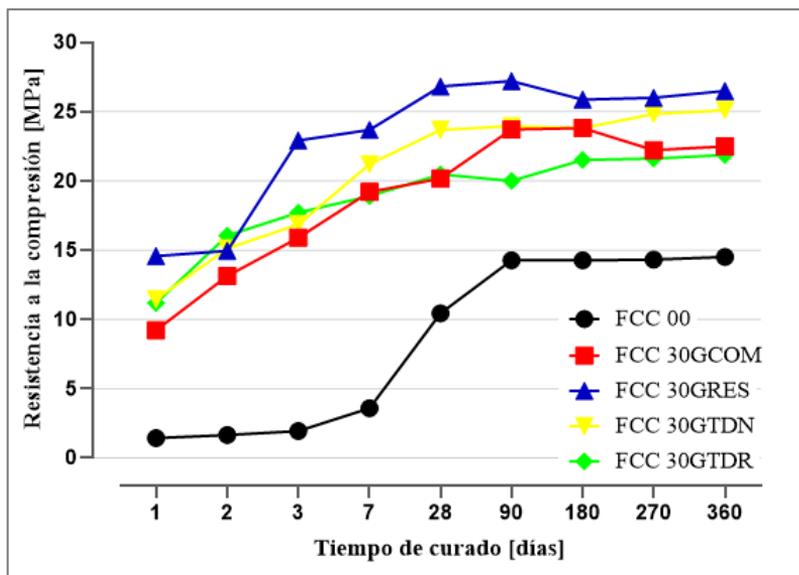


Figura 90 Rc de los morteros cal/FCC y distintos geopolímeros

### 4.3.3 Resistencia a la compresión de los morteros cal/CCA con sustituciones por geopolímero

En estos morteros debido a su diferencia reactividad puzolánica de la CCA y el FCC se cambió la relación cal/puzolana de 1/1 a 1/2.

Al igual que en los morteros de cal/FCC, primero se describe los morteros con sustituciones del binder cal/CCA por geopolímero fabricado con silicato comercial seguidos por las sustituciones de la fuente de sílice comercial por activadores alternativos.

**4.3.3.1 Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero comercial (CCA GCOM)**

En la Tabla 24 podemos observar la dosificación para los morteros cal/CCA control y para los distintos porcentajes para el geopolímero comercial y para el geopolímero alternativo obtenido a partir de la ceniza de cascara de arroz.

Tabla 24 Dosificación para los morteros cal/CCA-geopolímero comercial

Relación 1/2	Cal/puzolana [g]			Geopolímero [g]				Arena [g]
	Cal	CCA	H <sub>2</sub> O	FCC	Activator H <sub>2</sub> O NaOH Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>			
<b>CCA 00</b>	175,0	350,0	420,0	-	-	-	-	1575,0
<b>CCA 10GCOM</b>	157,5	315,0	378,0	52,5	12,6	6,4	29,5	1575,0
<b>CCA 20GCOM</b>	140,0	280,0	336,0	105,0	25,2	12,8	59,1	1575,0
<b>CCA 30GCOM</b>	122,5	245,0	294,0	157,5	37,8	19,2	88,6	1575,0
<b>CCA 40GCOM</b>	105,0	210,0	252,0	210,0	50,4	25,6	118,1	1575,0
<b>CCA 50GCOM</b>	87,5	175,0	210,0	262,5	63,0	32,0	147,7	1575,0

En la Figura 91 se representa la resistencia a compresión de las probetas cúbicas desde 1 día de curado a 360 días, en ella se han representado los datos del mortero control (CCA 00) y los de los distintos porcentajes de sustitución de la mezcla cal/CCA por geopolímero activado con reactivos comerciales. En la misma podemos observar que los valores de las resistencias a compresión del mortero control son muy bajas a edades anteriores a los 28 días de curado y que luego progresivamente aumentan hasta alcanzar aproximadamente 15 MPa a los 270 días de curado. Las sustituciones 10 y 20 % de geopolímero en las edades largas de curado obtienen valores de resistencias muy similares a las del mortero control.

## PROPIEDADES FÍSICAS

---

De hecho, es reseñable que los morteros con un 10 % de geopolímero prácticamente obtiene resultados de resistencia muy similares a los del control para todas las edades de curado, mientras que el que contiene un 20 % de geopolímero si tiene ventajas en edades cortas de curado debido a un incremento de la resistencia respecto al control. Este comportamiento difiere de lo obtenido en los morteros donde la puzolana empleada era el FCC, donde el porcentaje del 10 % de geopolímero si lograba clara ventajas respecto a su control.

En cambio, las sustituciones del 30, 40 y 50 % de geopolímero tanto en edades cortas como en edades largas presentan buenos resultados en el incremento de la resistencia a la compresión de hecho, a los 7 días de curado las tres series alcanzan una resistencia alrededor de 14 MPa, valor muy similar al que obtiene el mortero control a los 270 días de curado. Este valor pone de manifiesto la gran ventaja que supone la incorporación de las matrices geopoliméricas en cuanto a la obtención de resistencias a compresión mayores para un tiempo de curado corto respecto a los tradicionales morteros cal/puzolana.

El mortero cal/CCA con sustitución de dicha mezcla por geopolímero formado de silicato sódico comercial e hidróxido de sodio que mayores resistencias obtiene es el del 40 % de sustitución de geopolímero llegando a alcanzar los 21 MPa en las edades largas de curado.

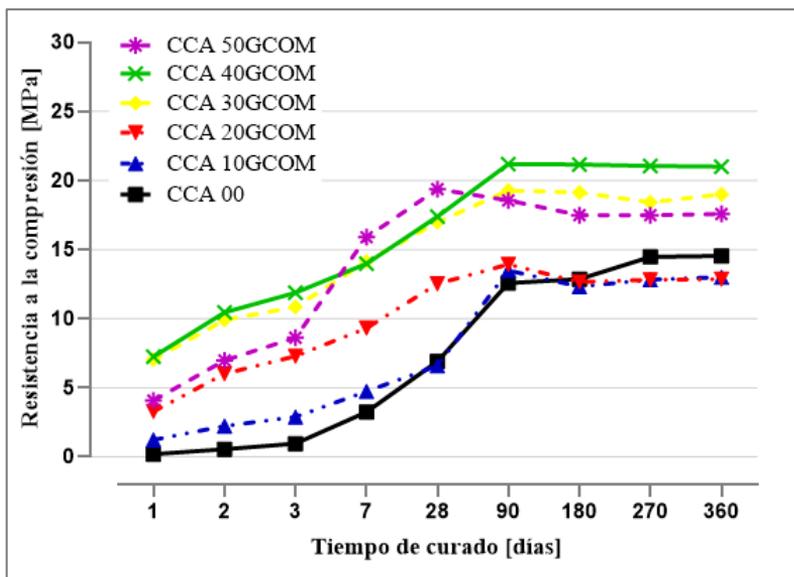


Figura 91 Rc de los morteros cal/CCA geopolímero comercial

#### 4.3.3.2 Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero a partir de CCA (CCA GRES)

En este apartado se sustituye el empleo del silicato comercial por la síntesis del silicato alternativo fabricado a partir de la reacción del NaOH con la CCA en el termo. En la Tabla 25 se muestra la dosificación empleada.

## PROPIEDADES FÍSICAS

Tabla 25 Dosificación para los morteros cal/CCA-geopolímero a partir de CCA

Relación 1/2	Cal/puzolana [g]			Geopolímero [g]				Arena [g]
	Cal	CCA	H <sub>2</sub> O	FCC	Activator			
					H <sub>2</sub> O	NaOH	CCA	
<b>CCA 00</b>	175,0	350,0	420,0	-	-	-	-	1575,0
<b>CCA 10GRES</b>	157,5	315,0	378,0	52,5	31,5	12,6	9,2	1575,0
<b>CCA 20GRES</b>	140,0	280,0	336,0	105,0	63,0	25,2	18,4	1575,0
<b>CCA 30GRES</b>	122,5	245,0	294,0	157,5	94,5	37,8	27,6	1575,0
<b>CCA 40GRES</b>	105,0	210,0	252,0	210,0	126,0	50,4	36,8	1575,0
<b>CCA 50GRES</b>	87,5	175,0	210,0	262,5	157,5	63,0	45,9	1575,0

En la Figura 92 se representan los valores de resistencia a compresión de todos los morteros incluido el control. En ella podemos observar que sustituyendo un 50 % de mezcla cal/CCA por geopolímero se obtiene la mayor resistencia a la compresión de toda la serie. Se alcanza 25 MPa a los 270 días de curado, suponiendo una diferencia superior a 10 MPa respecto del mortero control para esa misma edad de curado. Resulta llamativo la evolución de esta mezcla, puesto que la serie del 50 % de geopolímero tiene un desarrollo lento en las primeras edades de curado, siendo inferior al 20, 30 y 40 % de geopolímero, sin embargo, donde alcanza sus mayores ventajas respecto de los otros porcentajes de sustitución es tiempos largos de curado.

Cuando se sustituye un 10 % de mezcla cal/CCA por geopolímero si bien tiene un efecto favorable en edades cortas de curado porque existe un aumento sobre la resistencia, pero este efecto se ve reducido en edades largas de curado llegando incluso a obtener menores resistencias respecto del mortero control a partir de los 90 días de curado.

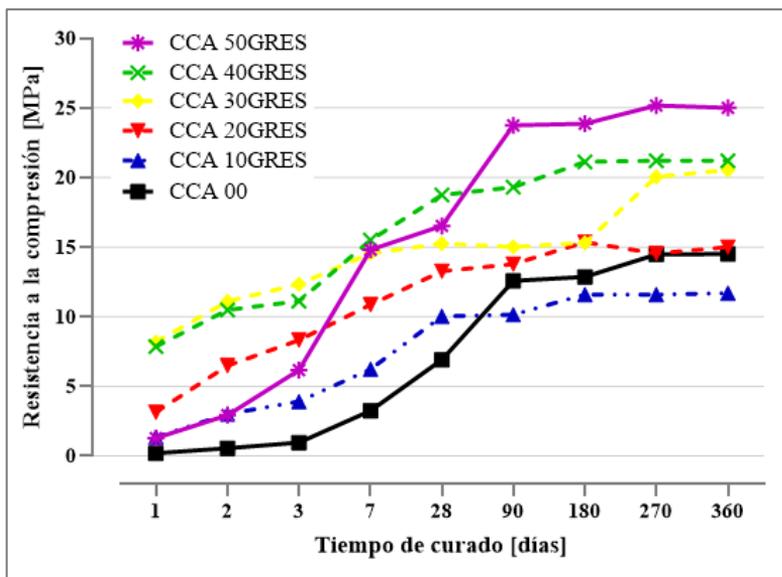


Figura 92 Rc de los morteros cal/CCA geopolímero a partir de CCA

## PROPIEDADES FÍSICAS

### 4.3.3.3 Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea natural (CCA GTDN)

En la Tabla 26 se muestra la dosificación de los morteros control y los morteros con geopolímero utilizando como fuente de sílice la tierra diatomea natural de Guatemala.

Tabla 26 Dosificación para los morteros cal/CCA-geopolímero a partir de TDN

Relación 1/2	Cal/puzolana [g]			Geopolímero [g]				Arena [g]
	Cal	CCA	H <sub>2</sub> O	FCC	Activator			
					H <sub>2</sub> O	NaOH	TDN	
CCA 00	175,0	350,0	420,0	-	-	-	-	1575,0
CCA 10GTDN	157,5	315,0	378,0	52,5	31,5	12,6	9,2	1575,0
CCA 20GTDN	140,0	280,0	336,0	105,0	63,0	25,2	18,4	1575,0
CCA 30GTDN	122,5	245,0	294,0	157,5	94,5	37,8	27,6	1575,0
CCA 40GTDN	105,0	210,0	252,0	210,0	126,0	50,4	36,8	1575,0
CCA 50GTDN	87,5	175,0	210,0	262,5	157,5	63,0	45,9	1575,0

Los morteros con geopolímero generado a partir del uso de tierra diatomea procedente de Guatemala presenta un comportamiento similar al geopolímero generado utilizando como fuente de sílice la CCA, siendo que los mejores resultados se obtienen con un 30, 40 y 50 % de geopolímero, tal como podemos observar en la Figura 93. En este caso tiene que pasar los 28 días de curado para que estos porcentajes de geopolímero alcancen una resistencia a la compresión de 15 MPa cuya resistencia corresponde a la del mortero control a 270 días.

También se puede observar que el mortero control a los 7 días de curado no alcanza ni los 5 MPa, pero en cambio con el 30 y 40 % de geopolímero a un día de curado se obtiene hasta 7 MPa.

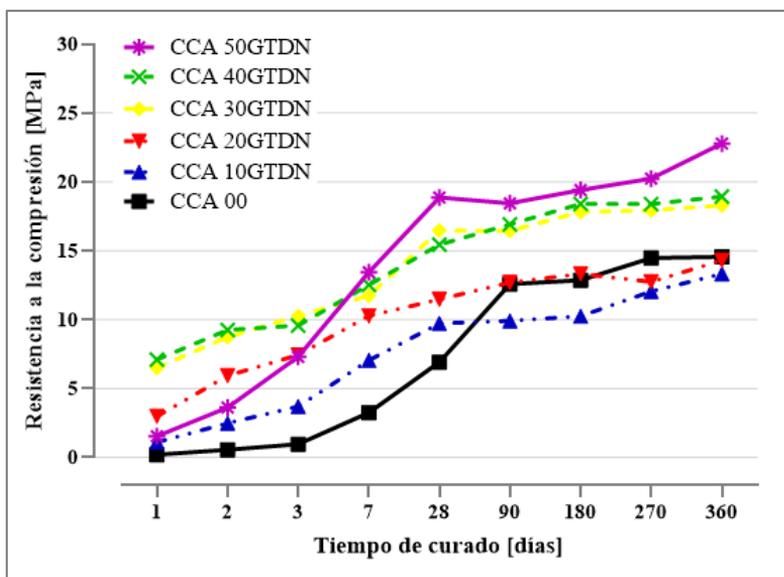


Figura 93 R<sub>c</sub> de los morteros cal/CCA geopolímero a partir de TDN

Con este mismo geopolímero en los morteros cal/FCC se observaba que los morteros con un 50 % de geopolímero presentaban resistencias a la compresión inferiores a los obtenidos por los porcentajes del 30 y 40 %, sin embargo, en los morteros con cal/CCA no se observa este comportamiento. En este caso no existen los mismos problemas de trabajabilidad que se observaban en los morteros con el FCC como parte de la mezcla cal/FCC. Se estaría corroborando que las resistencias obtenidas por la parte geopolimérica superan a la mezcla cal/puzolana y por tanto a mayor sustitución mayor resistencia mecánica.

## PROPIEDADES FÍSICAS

### 4.3.3.4 Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero a partir de tierra diatomea residual (CCA GTDR)

Por último, para terminar la serie de los morteros de cal/CCA, en la Tabla 27 se muestra la dosificación de los morteros cal/CCA y sus respectivas sustituciones por geopolímero fabricado utilizando como fuente de sílice la tierra diatomea residual de Heineken.

Tabla 27 Dosificación para los morteros cal/CCA-geopolímero a partir de TDR

Relación 1/2	Cal/puzolana [g]			Geopolímero [g]				Arena [g]
	Cal	CCA	H <sub>2</sub> O	FCC	Activator			
					H <sub>2</sub> O	NaOH	TDR	
<b>CCA 00</b>	175,0	350,0	420,0	-	-	-	-	1575,0
<b>CCA 10GTDR</b>	157,5	315,0	378,0	52,5	31,5	12,6	9,2	1575,0
<b>CCA 20GTDR</b>	140,0	280,0	336,0	105,0	63,0	25,2	18,4	1575,0
<b>CCA 30GTDR</b>	122,5	245,0	294,0	157,5	94,5	37,8	27,6	1575,0
<b>CCA 40GTDR</b>	105,0	210,0	252,0	210,0	126,0	50,4	36,8	1575,0
<b>CCA 50GTDR</b>	87,5	175,0	210,0	262,5	157,5	63,0	45,9	1575,0

En la Figura 94 podemos observar los valores de resistencia a la compresión para todos los morteros desde 1 día de curado hasta los 360 días. En la gráfica se corrobora como en los casos anteriores que los morteros con el 10 % de geopolímero presenta ventajas solo a tiempos cortos de curado respecto del mortero control, sin embargo, esta ventaja desaparece a media que incrementa la edad de curado. La serie con el 20 % de geopolímero obtiene ventajas en la resistencia a compresión en las primeras edades de curado y posteriormente partir de los 90 días de curado los valores de resistencia se asemejan a los obtenidos por el control.

Hasta los 3 días de curado solo el 30 y el 40 % de geopolímero desarrolla una resistencia a la compresión superior a los 10 MPa. En el caso del 50 % de geopolímero presenta una mínima resistencia a tiempos cortos, pero a partir de los 28 días de curado obtiene la mayor resistencia de todas las series, siendo muy similar a la obtenida por la serie del 40 %.

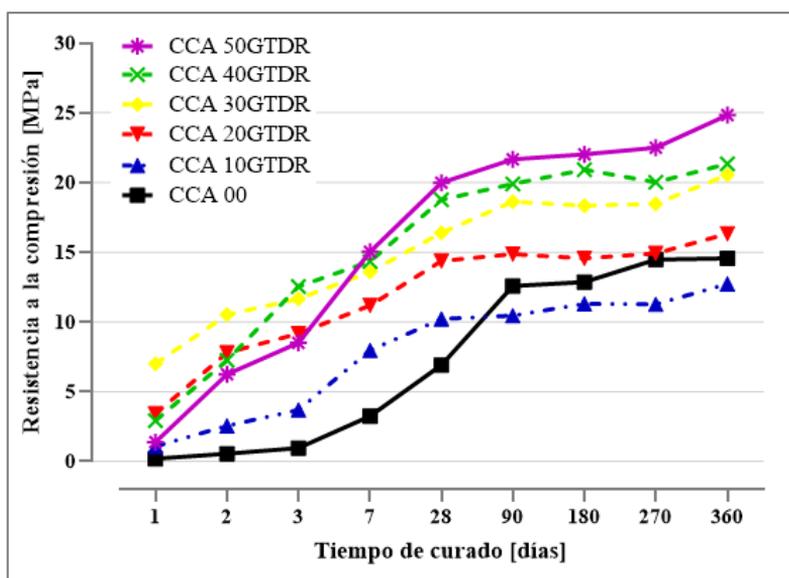


Figura 94 Rc de los morteros cal/CCA geopolímero a partir de TDR

### 4.3.3.5 Discusión de los morteros cal/CCA con los distintos tipos de geopolímero

De los resultados obtenidos de los cuatro tipos de mezclas de los geopolímeros con las distintas fuentes de sílice utilizadas en los morteros cal/CCA podemos mencionar las siguientes conclusiones:

Independientemente del tipo de fuente de sílice utilizada para fabricar el geopolímero, se ha podido observar que al sustituir el 10 y 20 % de geopolímero por la mezcla cal/CCA, su influencia es positiva solo para

## PROPIEDADES FÍSICAS

---

edades cortas de curado donde existe un incremento de la resistencia a la compresión respecto del mortero control, pero sin embargo en tiempos largos de curado ese efecto se ve reducido llegando incluso con el 10 % de geopolímero a tener menores resistencia que el mortero control.

Se puede decir que al utilizar la ceniza de cascara de arroz como puzolana solo a partir de sustituciones mayores al 30 % de cualquier geopolímero propuesto en este trabajo, se consigue mejorar la resistencia a la compresión a los tiempos muy cortos de curado.

En la Figura 95 se ha representado los 4 geopolímeros propuestos con el 30 % de sustitución, donde se observa que el geopolímero comercial tiene un mejor comportamiento en edades cortas de curado, pero a medida que avanza el tiempo de curado esta ventaja es superada por lo geopolímeros alternativos (GRES, GTDN, GTDR), siendo el geopolímero generado a partir de CCA el que tiene la mayor resistencia a la compresión.

También se puede observar que todos los morteros con un 30 % de geopolímero obtienen mejoras de resistencia respecto al mortero control en todas las edades de curado, siendo todos los valores de resistencia entre las distintas fuentes de sílice muy similares entre ellas en todas las edades de curado a excepción del mortero activado con CCA a los 90 y 180 días de curado que es inferior al resto. Viendo la evolución en el resto de edades puede ser que estos dos datos más bajos se deban a un error experimental de los mismos.

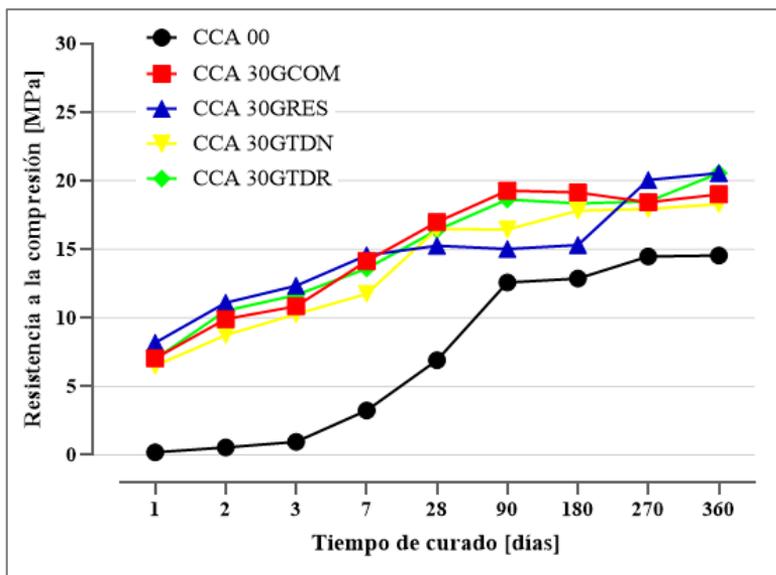


Figura 95 Rc de los morteros cal/CCA y distintos geopolímeros

#### 4.3.4 Resistencia a la compresión de los morteros cal/CLD con sustituciones por geopolímero

Por último, se establece el estudio de la influencia de la incorporación de matrices geopoliméricas a mezclas cal/CLD. Como se comentó anteriormente en este caso la relación óptima cal/puzolana es la 1/3 en base a estudios previos realizados por el grupo de investigación [101].

En este tipo de morteros únicamente se emplean dos tipos de fuente de sílice, el silicato de sodio comercial y el sintetizado a partir de la CCA.

## PROPIEDADES FÍSICAS

### 4.3.4.1 Mezclas cal/CLD con sustituciones por geopolímero comercial (CLD GCOM)

En la siguiente Tabla 28 se muestra las dosificaciones para los morteros cal/ceniza de lodo de depuradora preparados con el geopolímero a partir del silicato sódico comercial.

Tabla 28 Dosificación para los morteros cal/CLD-geopolímero comercial

Relación 1/3	Cal/puzolana [g]			Geopolímero [g]				Arena [g]
	Cal	CLD	H <sub>2</sub> O	FCC	Activator H <sub>2</sub> O NaOH Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>			
<b>CLD 00</b>	131,3	393,8	420,0	-	-	-	-	1575,0
<b>CLD 10GCOM</b>	118,1	354,4	378,0	52,5	12,6	6,4	29,5	1575,0
<b>CLD 20GCOM</b>	105,0	315,0	336,0	105,0	25,2	12,8	59,1	1575,0
<b>CLD 30GCOM</b>	91,9	275,6	294,0	157,5	37,8	19,2	88,6	1575,0
<b>CLD 40GCOM</b>	78,8	236,2	252,0	210,0	50,4	25,6	118,1	1575,0
<b>CLD 50GCOM</b>	65,6	196,9	210,0	262,5	63,0	32,0	147,7	1575,0

En la Figura 96 se representan las resistencias a la compresión del mortero control (CLD 00) y los morteros con geopolímero curados hasta 360 días. En ella podemos observar que los morteros con el 40 y el 50 % de geopolímero fabricados a partir del silicato sódico comercial e hidróxido de sodio fueron los morteros que obtuvieron los mejores comportamientos respecto a los otros porcentajes de sustitución tanto en tiempo corto como en tiempo largo de curado. Para el resto de porcentajes de sustitución las mejoras en resistencia de los morteros con geopolímero respecto a los morteros control se dan sobre todo hasta los 28 días de curado.

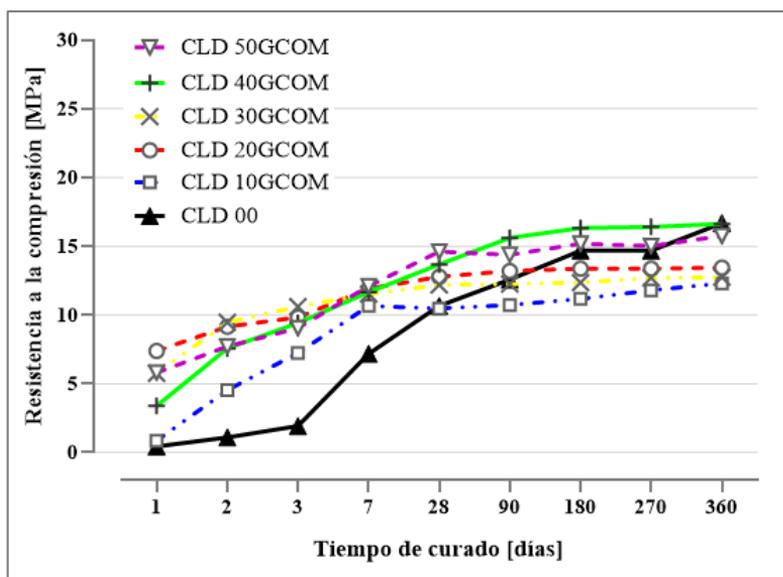


Figura 96 R<sub>c</sub> de los morteros cal/CLD geopolímero comercial

#### 4.3.4.2 Mezclas cal/ CLD con sustituciones por geopolímero a partir de CCA (CLD GRES)

En la Tabla 29 se muestra la dosificación de los morteros fabricados con geopolímeros que contienen como fuente de sílice la CCA.

Tabla 29 Dosificación para los morteros cal/CLD-geopolímero residual

Relación 1/3	Cal/puzolana [g]			Geopolímero [g]				Arena [g]
	Cal	CLD	H <sub>2</sub> O	FCC	Activador			
					H <sub>2</sub> O	NaOH	CCA	
<b>CLD 00</b>	131,3	393,8	420,0	-	-	-	-	1575,0
<b>CLD 10 GRES</b>	118,1	354,4	378,0	52,5	31,5	12,6	9,2	1575,0
<b>CLD 20 GRES</b>	105,0	315,0	336,0	105,0	63,0	25,2	18,4	1575,0
<b>CLD 30 GRES</b>	91,9	275,6	294,0	157,5	94,5	37,8	27,6	1575,0
<b>CLD 40 GRES</b>	78,8	236,2	252,0	210,0	126,0	50,4	36,8	1575,0
<b>CLD 50 GRES</b>	65,6	196,9	210,0	262,5	157,5	63,0	45,9	1575,0

## PROPIEDADES FÍSICAS

En la Figura 97 podemos observar que sustituyendo un 10 % de la mezcla cal/CLD por geopolímero se tiene una evolución lenta en edades cortas de curado hasta los 7 días respecto al resto de porcentajes de sustitución de geopolímero, pero a partir de esa edad la diferencia respecto al resto de morteros con geopolímero es mínima. Obteniendo todos los porcentajes de sustitución valores muy similares entre ellos.

También se puede observar que a excepción de ese mortero con el 10 % el resto de mezclas geopoliméricas a 7 días de curado prácticamente alcanzan o superan el valor de resistencia a compresión que alcanza el mortero control a los 180 días de curado, es decir, se consigue una ventaja en resistencias en edades muy tempranas respecto al mortero tradicional cal/puzolana.

Para esta puzolana todos los porcentajes de sustitución de geopolímero generado a partir de la CCA tienen un buen comportamiento mecánico respecto del mortero control.

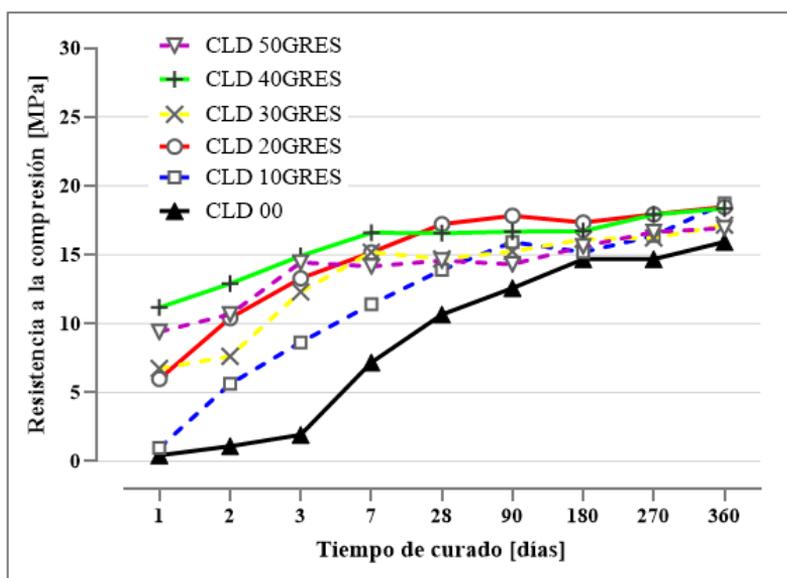


Figura 97 Rc de los morteros cal/CLD geopolímero a partir de CCA

4.3.4.3 Discusión de los morteros cal/CLD con sustituciones por geopolímeros.

Al utilizar la ceniza de lodo de depuradora como puzolana, con los resultados obtenidos podemos afirmar que el geopolímero generado a partir de CCA como fuente de sílice tiene un mejor comportamiento que el geopolímero a partir de silicato sódico comercial e hidróxido sódico, independientemente del porcentaje de sustitución de geopolímero.

En la Figura 98 se ha representado el 30 % de sustitución de los 2 geopolímeros utilizados en morteros de cal/CLD, el ella podemos observar que el geopolímero comercial tiene un efecto favorable hasta los 28 días de curado, pero en edades largas de curado este beneficio se pierde debido a que presenta valores menores que el mortero control (CLD 00)

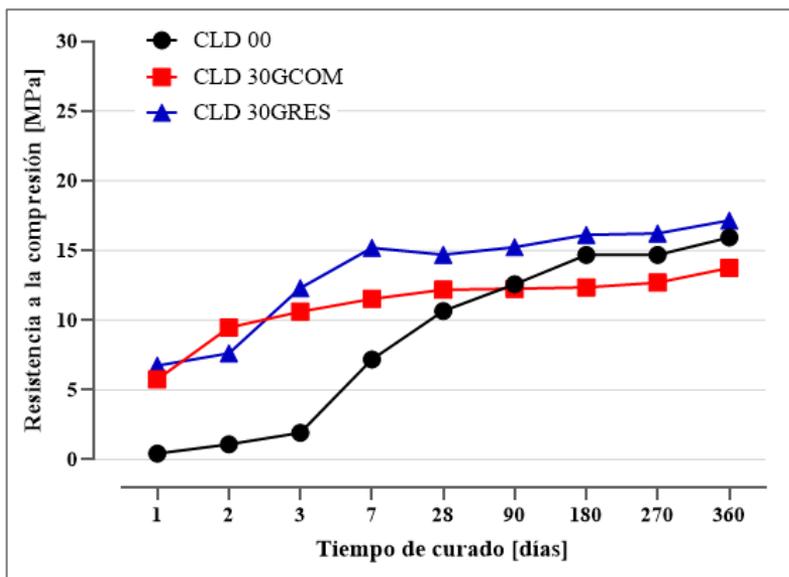


Figura 98 Rc de los morteros cal/CLD geopolímero comercial y residual

## PROPIEDADES FÍSICAS

### 4.3.5 Discusión del comportamiento de las diferentes puzolanas con relación a la resistencia en la compresión.

En referencia al geopolímero elaborado con silicato sódico comercial en la Figura 99 se representa los morteros control de las 3 puzolanas utilizadas y el 30 % de sustitución de este geopolímero. Se observa que los 3 morteros control tienen un comportamiento similar llegando alcanzar alrededor de 15 MPa a los 180 días de curado. También es la puzolana del FCC quien presenta el mejor comportamiento cuando se utiliza este 30 % de geopolímero, seguido por la puzolana CCA y finalmente la puzolana CLD.

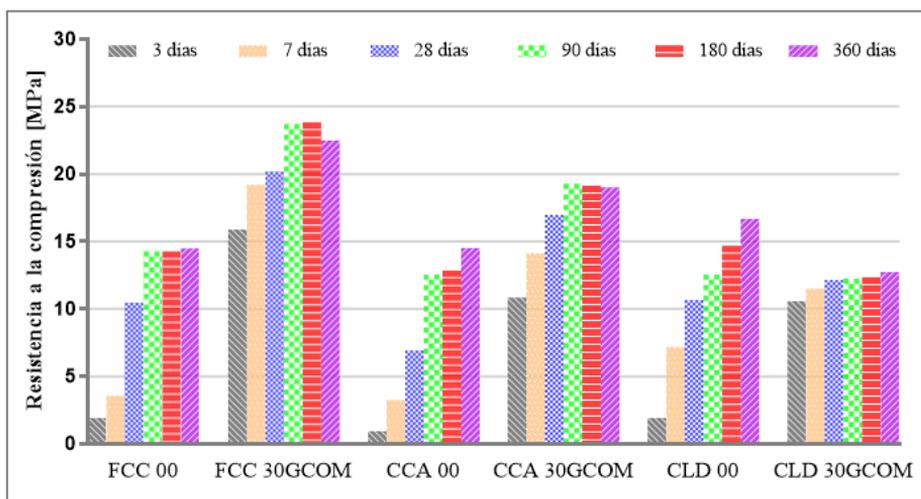


Figura 99 Rc de los morteros control y con 30 % de geopolímero comercial

En la Figura 100 se observa la resistencia a la compresión de los morteros control y los morteros con el 30 % del geopolímero elaborado a partir de la CCA sustituyendo a las diferentes mezclas cal/puzolana, nuevamente los morteros elaborados con la puzolana del FCC y este tipo de

geopolímero tienen un mejor comportamiento respecto de las tres puzolanas.

Que los morteros cal/FCC tengan mayores resistencias mecánicas que los morteros cal/CCA podrían ser debido a que los valores del factor de eficacia cementante del FCC es mayor que el de la CCA, tal como describe el artículo “El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas” cuyos resultados obtenidos tienen el siguiente orden: FCC>MK>CCA> HS (Humo de sílice) [142], aunque este estudio es para conglomerantes de cemento, queda demostrado que la actividad puzolánica del FCC es mayor que la del resto.

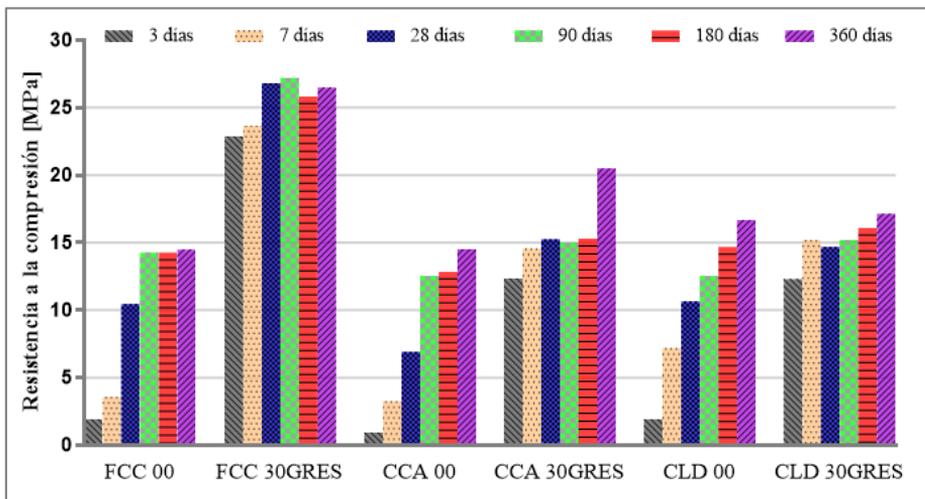


Figura 100 Rc de los morteros control y con 30 % de geopolímero a partir de CCA

En la Figura 101 podemos observar los morteros control con las puzolanas FCC y CCA, junto al 30 % del geopolímero a partir de la tierra diatomea natural y el 30 % del geopolímero a partir de la tierra diatomea del filtrado de cerveza. En el caso de la puzolana del FCC es el

## PROPIEDADES FÍSICAS

geopolímero de tierra diatomea natural el que tiene mejor comportamiento respecto al geopolímero de la tierra diatomea residual y para la puzolana de la CCA ambos geopolímeros tienen un comportamiento similar.

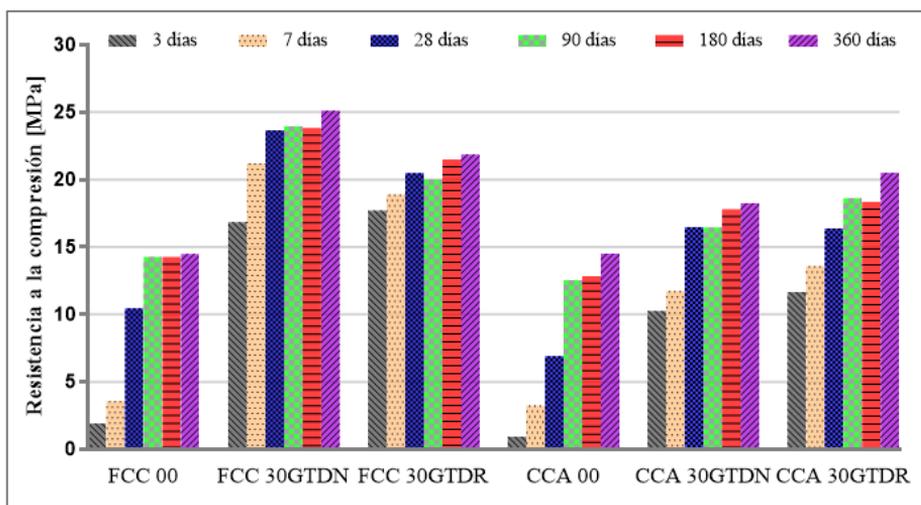


Figura 101 Rc de los morteros control y geopolímeros a partir de TD

Como se puede apreciar en los resultados mostrados para las 3 puzolanas, no existe un patrón común y se encuentra que para cada mezcla cal/puzolana puede existir un óptimo de sustitución por geopolímero comercial o alternativo.

Al utilizar el FCC como puzolana, podemos indicar que algunos de los mejores resultados en la resistencia a la compresión se dan dentro el rango del 20 y el 40 % de sustitución en peso de la mezcla cal/FCC por geopolímero fabricado utilizando el FCC como precursor y activador el silicato comercial o con diferentes fuentes de sílice alternativas, con el 50 % se pierde el beneficio de añadir geopolímero en una matriz

cal/puzolana, debido a que se tiene un comportamiento igual o peor que el mortero control, tal vez este comportamiento sea debido a su problema de trabajabilidad con este porcentaje durante el vibrado de las probetas. Se puede decir que al utilizar la ceniza de cascara de arroz como puzolana solo a partir de sustituciones mayores al 30 % de cualquier geopolímero propuesto en este trabajo, se consigue mejorar la resistencia a la compresión desde tiempos muy cortos de curado. Y al utilizar la ceniza de lodo de depurado como puzolana, la incorporación del geopolímero tanto comercial o alternativo, también se necesita porcentajes de sustitución superiores al 30 % para otórgales altas resistencias mecánicas iniciales respecto del mortero control.

Con todo lo mencionado anteriormente se ha demostrado que incorporar pequeñas cantidades del geopolímero elaborado con silicato comercial o silicato alternativo sobre el sistema cal/puzolana fue notable, porque potenció la formación de los nuevos productos de reacción, mejorando considerablemente la resistencia de los morteros desde las primeras edades de curado. En los morteros mixtos estudiados podemos mencionar de manera general, que los principales productos de reacción se deben al desarrollo de las fases SCH, SACH, ACH, derivados de la reacción puzolánica y a los geles NASH o C(N)ASH derivados de la reacción geopolimérica. Junto a la formación de estos productos confirmados por los estudios de termogravimetría también se corrobora la formación de fases zeolíticas de la reacción geopolimérica mediante los estudios de microscopía electrónica.

## PROPIEDADES FÍSICAS

---

Estos resultados están de acuerdo a otras investigaciones tal es el caso de Arizzi y Cultrone [55], donde mencionan también la formación de estas fases debido a la reacción puzolánica del FCC con la cal hidratada. También Pavlíková et al. [143], indica que el aumento de la resistencia mecánica son debido a SCH y SACH formadas dentro de la reacción puzolánica del metacaolín y ceniza de biomasa con hidrato de cal. Por su parte Rodríguez et al. [58], demuestra que las fases principales que participan en la reacción de geopolimerización que incluye el FCC son las fases zeolíticas, que conducen a una estructura más densa, que se traduce en el aumento de las resistencias mecánicas.

Por lo tanto, podemos afirmar que existe claramente diferencia al comparar los morteros puzolánicos con o sin geopolímero en referencia a la resistencia de la compresión

En base a la norma UNE EN 998-2 [144] se establece una clasificación de la resistencia a la compresión para los morteros diseñados (aquellos que tienen por objeto alcanzar unas propiedades específicas), en la Tabla 30 podemos observar esta clasificación.

Tabla 30 Resistencia a la compresión de los morteros de albañilería según EN 998-2

Resistencia a la compresión de los morteros de albañilería según EN 998-2							
Clase	M 1	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	M d
Resistencia a la compresión (N/mm <sup>2</sup> )	1	2,5	5	10	15	20	d

d: Para resistencias a la compresión mayores a 25 N/mm<sup>2</sup>, es el valor declarado por el fabricante

Al incorporar el geopolímero alternativo a partir de la CCA (GRES) en una matriz cal/puzolana se ha llegado a obtener resistencias de hasta 25 MPa con las puzolanas FCC y la CCA, y de 15 MPa con la CLD, y de acuerdo a la clasificación de la norma EN 998-2 las podemos designar como Md para los morteros con FCC y CCA y M15 para los de CLD.

Finalmente, podemos afirmar que se ha resuelto el problema que presentan los morteros de cal y cal/puzolana respecto a su baja resistencia mecánica inicial a primeras edades de curado, razón por la cual los morteros de cal son a menudo descartados para ciertas aplicaciones.

Además, se ha observado un comportamiento similar o mejor cuando se emplea los geopolímeros activados con fuentes de sílice alternativas respecto del geopolímero comercial, haciendo que los morteros sean más sostenibles y de menor coste económico-medioambiental

### **4.4 Ensayos de durabilidad**

La vida útil de un material de construcción puede de alguna forma contribuir a reducir el cambio climático, porque al tener mayor vida útil no se construirá obra para reemplazar la que ya existe y por lo tanto no será necesario consumir más recursos naturales ni energéticos para su nueva fabricación. Además, si al terminar su ciclo de vida el residuo obtenido necesita el mínimo tratamiento para su reciclaje, entonces nos encontramos ante un material de construcción sostenible.

Existen diferentes factores descritos por investigaciones que pueden afectar la durabilidad de un mortero, entre las más importantes podemos mencionar el contenido de aire, la porosidad, la estructura de poros, la permeabilidad, la absorción de agua por capilaridad, los ciclos de hielo y deshielo, cambios de temperatura, exposición a los agentes atmosféricos, entre otros [145].

Continuando con las propiedades físicas de los morteros en estado endurecido a continuación, describimos los ensayos de absorción de agua por capilaridad y ciclos de hielo deshielo.

#### **4.4.1 Pruebas de absorción de agua por capilaridad**

Conocer el valor del coeficiente de absorción de agua por capilaridad en morteros es importante para tener una idea de la durabilidad de los mismos a largo plazo. El valor del balance de agua en el interior de mortero está estrechamente relacionado con la porosidad.

Para este ensayo se utilizó como referencia la norma UNE-EN 1015-18 [124] para determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad (CAA). De los morteros mixtos solo se ensayaron los que tienen el 30 % de sustitución de las mezclas cal/puzolana por geopolímero comercial o alternativo.

En primer lugar, se describe los morteros con la puzolana del catalizador gastado de craqueo catalítico, seguido de la ceniza de cascara de arroz y finalmente la ceniza de lodo de depuradora. Los resultados que se presentan son la media aritmética de 6 probetas, cuya edad de curado de las probetas fue de 180 días.

### **4.4.1.1 Mezclas cal/FCC con sustituciones por geopolímero comercial y alternativos**

En la Figura 102 se representa los valores del coeficiente de absorción de agua para el mortero control cal/FCC (FCC 00) y los morteros con un 30 % de sustitución de esta mezcla por geopolímero. En dicha gráfica podemos observar que los morteros con geopolímero obtienen todos menores valores de coeficiente de absorción de agua que el mortero control. Y dentro de los morteros con un 30 % de geopolímero, los activados con fuente de sílice alternativa generados a partir de residuos y de la tierra de diatomea natural, reducen más el coeficiente de absorción de agua que al utilizar el geopolímero comercial. Siendo el geopolímero elaborado a partir de la tierra diatomea natural (FCC 30GTDN) el que presenta el valor más bajo con un dato de  $0,36 \text{ Kg}/(\text{m}^2\text{min}^{0,5})$ , llegando a reducir hasta el 57,1 % de absorción de agua por capilaridad respecto al mortero control.

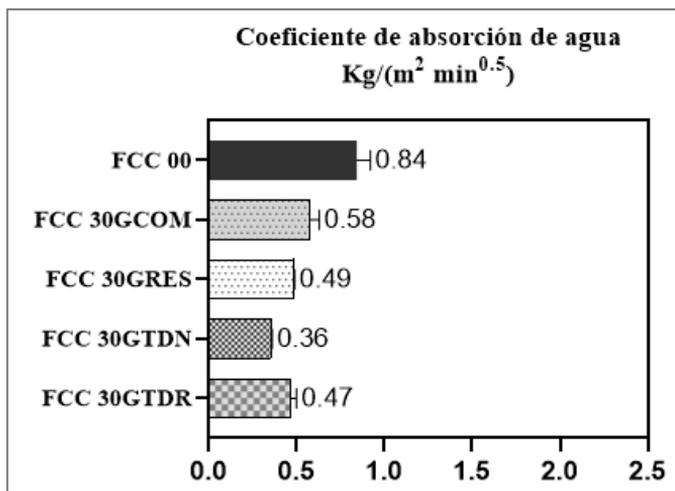


Figura 102 CAA para los morteros cal/FCC-geopolímeros

### 4.4.1.2 Mezclas cal/CCA con sustituciones por geopolímero comercial y alternativos

En la Figura 103 se representa los valores de los coeficientes de absorción de agua para el mortero control cal/CCA (CCA 00) y las mezclas con un 30 % de sustitución por geopolímeros. En dicha gráfica podemos observar que nuevamente los morteros con geopolímeros obtienen menores valores que el obtenido por el mortero control. Estos morteros geopoliméricos tienen todos valores en el rango entre 0,86 y 0,69 Kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0.5</sup>). Llegando a reducir el 62,7 % el valor del CAA el geopolímero respecto del mortero control.

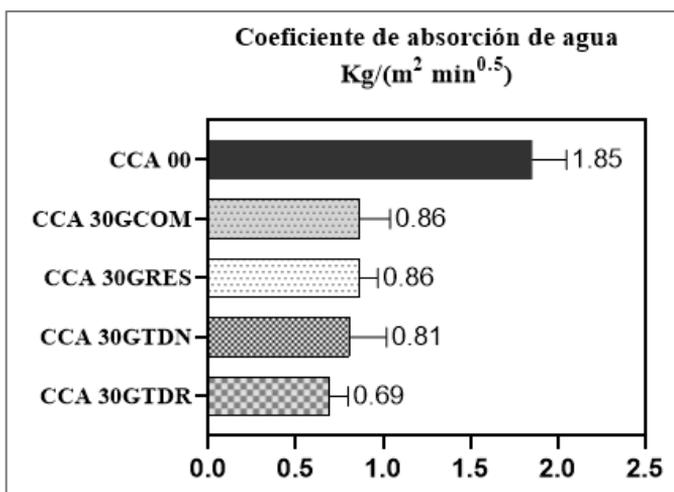


Figura 103 CAA para los morteros cal/CCA-geopolímeros

#### 4.4.1.3 Mezclas cal/CLD con sustituciones por geopolímero comercial y alternativos

Por último, se realizaron las medidas del CAA en las mezclas que contienen a la CLD como puzolana. En la Figura 104 podemos observar valores similares en el coeficiente de absorción de agua para el mortero con la sustitución de geopolímero comercial y el que contiene el geopolímero a partir de CCA, en ambos casos se llega a reducir hasta un 44,1 % el valor del CCA respecto al valor obtenido por el mortero control. Nuevamente se verifica que la incorporación del geopolímero a una matriz cal/puzolana es muy favorable, ya que reduce la absorción de agua por capilaridad, lo que puede significar que existe una menor porosidad en los morteros que tienen geopolímero a diferencia de los morteros sin geopolímero.

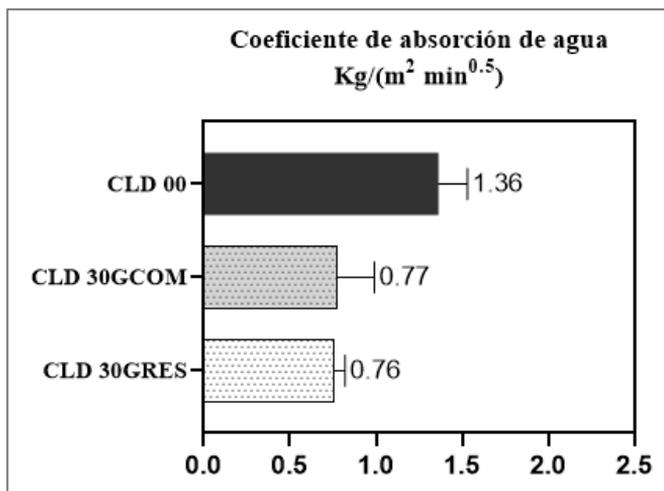


Figura 104 CAA para los morteros cal/CLD-geopolímeros

#### 4.4.1.4 Discusión del comportamiento de las diferentes puzolanas con relación a la absorción de agua por capilaridad

Las propiedades de absorción de agua capilar en un material están directamente relacionadas con las características de la red de poros: tamaños, formas de poros y otros factores [145].

Los valores encontrados en morteros de cal y cal/puzolana en el estudio Veiga et al. [146], con referencia al coeficiente de absorción de agua por capilaridad, para los morteros de cal fueron entre 1,1 - 1,6 Kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0.5</sup>). Y para los morteros cal/puzolana de 2,3 Kg/m<sup>2</sup> min<sup>0.5</sup> (cal/polvo de ladrillo); 1,6 Kg/m<sup>2</sup>min<sup>0.5</sup> (cal/metacaolín); 1,4 Kg/m<sup>2</sup>min<sup>0.5</sup> (cal/humo de sílice) y de 1,1 Kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0.5</sup>) para el mortero cal/polvo de vidrio.

Otros datos encontrados en la bibliografía arrojan valores mayores a los mostrados anteriormente. Izaguirre et al.[147] realizaron medidas de CAA en morteros fabricados con cal aérea y modificada con dos aditivos

que mejoraban la viscosidad y actuaban como agentes que retienen agua. Los valores obtenidos de CAA variaban desde valores de 2,36 Kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0.5</sup>) del mortero con únicamente cal a valores de 1,96 Kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0.5</sup>) obtenido por una de las mezclas con aditivo. Estos valores son superiores a los obtenidos por Veiga et al. [146] pero es lógico puesto que la relación árido/binder en el estudio de Izaguirre era mayor.

En nuestro caso solo los morteros control (cal/puzolana) tienen valores altos en el coeficiente de absorción de aguas siendo el mortero cal/CCA (CCA 00) el que obtiene el valor más alto de CAA con un valor de 1,85 Kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0.5</sup>), seguido por la mezcla cal/CLD (CLD 00) con 1,36 Kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0.5</sup>) y finalmente el mortero cal/FCC (FCC 00) que obtiene un valor de CAA de 0,84 Kg/(m<sup>2</sup>min<sup>0.5</sup>). Estos resultados están dentro el rango comentado anteriormente obtenidos por Veiga et al. [146] sobre morteros de cal/puzolana.

Respecto a la absorción de agua en morteros de cal/puzolana, en el estudio de Billong et al. [69] se obtiene menores valores al utilizar el MK (16 %) que al utilizar la CCA (18 %), resultados que son similares a los nuestros ya que el FCC tiene menor coeficiente de absorción de agua por capilaridad que la CCA. Si consideramos que el FCC tiene características similares al MK, tal como han descrito otras investigaciones, los resultados obtenidos son coherentes con los hallados en la bibliografía.

Al incorporar un 30 % de geopolímero comercial o alternativos en sustitución de la mezcla cal/puzolana para todas las puzolanas ensayadas observamos que dicha incorporación tiene un efecto beneficioso en los morteros de cal/puzolana, debido a que reducen el coeficiente de

## ENSAYOS DE DURABILIDAD

---

absorción de agua por capilaridad en todos los casos. La incorporación del geopolímero está haciendo que estos morteros sean menos permeables frente al agua y por tanto pueden ser más durables, la formación de nuevos productos de reacción a parte de los formados en la reacción puzolánica densifican la matriz. Cabe señalar que los morteros con geopolímeros alternativos propuestos tienen valores iguales o inferiores que los morteros realizados con el geopolímero comercial. Este último dato es muy relevante puesto que el poder sustituir el silicato comercial por uno alternativo hacen que las mezclas sean más sostenibles al ser elaboradas a partir de residuos prácticamente en su totalidad menos por el empleo del hidróxido de sodio.

Los valores más bajos en el parámetro CAA se obtienen al utilizar el geopolímero con TDN o TDR ya sea en una matriz cal/FCC o cal/CCA, esto podría ser debido a que la TD o diatomita es un material muy apreciado para la mejora de suelos porque aumenta la penetración del aire, la capacidad de retención de agua, la infiltración y otros aspectos, debido a su pequeño tamaño de partícula, alta superficie y porosidad, además parte de estas tierras de diatomea han podido quedar sin reaccionar en la preparación del activador alcalino y por lo tanto pueden estar ejerciendo este poder de retención de agua en las mezclas que lo contienen. Tavares et al. [110] concluye que la adición de diatomita a una matriz de cal actúa como barreras impermeabilizantes y pueden sustituir al petróleo crudo utilizado como capa de impermeabilización en la construcción de mampostería de piedra.

Por otro lado, el código técnico de la edificación de España tiene 3 categorías para las propiedades del mortero endurecido en relación a la absorción de agua por capilaridad, las cuales son:  $W_c 0$  (no especificado),  $W_c 1$  ( $C \leq 0,40 \text{ Kg/m}^2 \text{mim}^{0,5}$ ) y  $W_c 2$  ( $C \leq 0,20 \text{ Kg/m}^2 \text{mim}^{0,5}$ ). Solo el mortero FCC 30GTDN tiene un coeficiente de  $0,35 \text{ Kg/m}^2 \text{mim}^{0,5}$  y puede ser considerado dentro la categoría  $W_c 1$ , sin embargo, los demás morteros tienen un coeficiente superior a  $0,40 \text{ Kg/(m}^2 \text{mim}^{0,5})$ , por lo cual para su aplicación exterior debe estar dotada de un aditivo hidrofóbico aplicado durante o después de su elaboración, para garantizar una vida útil adecuada.

### 4.4.2 Ciclos de hielo y deshielo

El deterioro de un material de construcción puede ser causado por los cambios de temperatura y humedad ayudando a reducir la vida útil del material y favoreciendo la desintegración físico-químico en la estructura del material. Por este motivo se realizaron las pruebas de hielo y deshielo tal como se explicó en el apartado 3.2.8.

Para los ensayos de durabilidad de los ciclos de hielo-deshielo los morteros fueron curados durante 180 días y una de las series se sometió al ensayo a compresión para saber la resistencia inicial para determinar el punto de partida. En el caso de la resistencia a la compresión el valor corresponde a la media aritmética de 6 probetas y de 3 probetas para los valores de la resistencia a la flexotracción.

En la Tabla 31 podemos observar la resistencia a la compresión de los diferentes morteros mixtos y la variación de la resistencia a los 6 y 30 ciclos, como era de esperar existe una disminución de la resistencia después de los 30 ciclos de hielo-deshielo para todos los morteros cal/puzolana con las diferentes puzolanas y para todos los morteros con sustitución por geopolímeros. Hasta los 6 ciclos no se tienen variaciones de resistencia superiores al 40 % para ninguno de los morteros ensayados. Los valores de pérdida de resistencia varían entre el 3,41 % del mortero CCA 30GCOM hasta el valor de un 33,03 % de pérdida obtenido por el mortero FCC 30GRES. Estando la mayoría de pérdidas de resistencias alrededor de 15 - 20 %.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al llegar a los 30 ciclos si existen pérdidas superiores al 40 %, tal es el caso del mortero FCC 30GRES y el mortero CLD 30GCOM. Las pérdidas de resistencia se sitúan en el rango entre el 19,49 y el 40,70 %.

Tabla 31 Resistencia a la compresión y % de variación de la resistencia de los morteros mixtos

Probetas	Resistencia a la compresión (MPa)			Variación de la resistencia (%)	
	0 Ciclos	6 Ciclos	30 Ciclos	6 Ciclos	30 Ciclos
<b>FCC 00</b>	<b>12,83</b>	<b>11,27</b>	<b>10,22</b>	<b>12,18</b>	<b>20,40</b>
FCC 30GCOM	23,50	19,77	17,75	15,86	24,49
FCC 30GRES	27,40	18,35	16,43	33,03	40,03
FCC 30GTDN	25,19	23,70	19,77	5,93	21,53
FCC 30GTDR	24,40	21,05	16,46	13,73	32,54
<b>CCA 00</b>	<b>10,12</b>	<b>7,55</b>	<b>6,92</b>	<b>25,35</b>	<b>31,58</b>
CCA 30GCOM	17,50	16,90	14,09	3,41	19,49
CCA 30GRES	16,19	13,79	12,04	14,80	25,66
CCA 30GTDN	16,21	12,81	11,54	20,95	28,84
CCA 30GTDR	18,08	14,71	11,93	18,64	34,02
<b>CLD 00</b>	<b>10,39</b>	<b>8,82</b>	<b>7,37</b>	<b>15,05</b>	<b>29,05</b>
CLD 30GCOM	12,62	10,68	7,48	15,33	40,70
CLD 30GRES	15,87	13,00	10,68	18,09	32,74

En la Tabla 32 podemos observar la resistencia a la flexotracción y el porcentaje de variación de la resistencia para los diferentes morteros control y los que contienen geopolímeros. De partida cabe señalar que los valores de resistencia a flexotracción de los morteros de cal son muy bajos de por sí antes de someterse a los ciclos hielo deshielo. Como se

## ENSAYOS DE DURABILIDAD

puede observar en la tabla después de los 6 ciclos existe una reducción de la resistencia a la flexotracción, en el intervalo entre el 27,97 % de pérdida del mortero CLD 00 y el 84,62 % del mortero FCC 30GRES. Para los 30 ciclos las pérdidas de resistencia se sitúan entre el valor de 44,76 % obtenido nuevamente por el mortero CLD 00 y el 89,63 % del mortero CCA 30GTDR.

Tabla 32 Resistencia a la flexotracción y % de variación de la resistencia de los morteros mixtos

Probetas	Resistencia a la flexotracción (MPa)			Variación de la resistencia (%)	
	0 Ciclos	6 Ciclos	30 Ciclos	6 Ciclos	30 Ciclos
<b>FCC 00</b>	<b>1,98</b>	<b>0,78</b>	<b>0,71</b>	<b>60,47</b>	<b>64,34</b>
FCC 30GCOM	3,70	0,86	0,39	76,81	89,44
FCC 30GRES	3,79	0,58	0,48	84,62	87,45
FCC 30GTN	3,72	2,24	0,43	39,92	88,48
FCC 30GTDR	3,72	1,29	0,39	65,43	89,51
<b>CCA 00</b>	<b>1,18</b>	<b>0,43</b>	<b>0,41</b>	<b>63,64</b>	<b>64,94</b>
CCA 30GCOM	2,21	1,23	0,67	44,44	69,79
CCA 30GRES	2,47	0,48	0,43	80,75	82,61
CCA 30GTN	2,20	0,55	0,35	74,91	83,97
CCA 30GTDR	2,88	1,06	0,30	63,30	89,63
<b>CLD 00</b>	<b>2,19</b>	<b>1,58</b>	<b>1,21</b>	<b>27,97</b>	<b>44,76</b>
CLD 30GCOM	2,62	1,23	0,35	53,22	86,55
CLD 30GRES	3,00	1,49	0,61	50,51	79,59

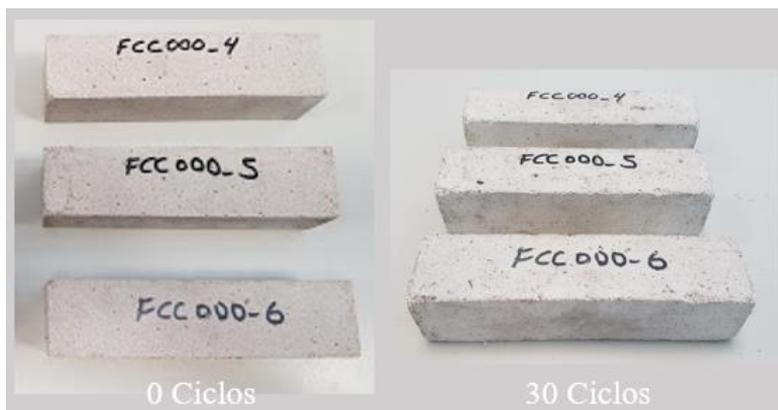
Para los morteros de cal con geopolímero se ha conseguido mejorar ligeramente la resistencia a flexotracción respecto a sus correspondientes morteros control, aunque posteriormente el tener geopolímero no impide

que se pierda resistencia al someterlos a los ciclos hielo deshielo. Se han buscado referencias bibliográficas sobre los valores de resistencia a flexotracción, así se han encontrado valores relativamente bajos para la resistencia a la flexotracción por ejemplo en las investigaciones de Boffill et al. [148], los autores encuentran para un mortero de cal aérea CL90-S y árido de origen silíceo con relación cal/árido de 1/3 una resistencia de 0,68 MPa a los 182 días de curado, y en el estudio de Pavlíková et al. [143] utilizando morteros de cal/puzolana con relación agua/binder de 0,9 y binder/árido de 1/3, su resistencia fue de 0,51 MPa y 0,75 MPa para los 28 y 365 días de curado respectivamente. Comparando estos valores con los obtenidos en nuestros morteros se observa que se superan estos valores para todas las mezclas ensayadas hasta incluso los morteros con solo cal/puzolana.

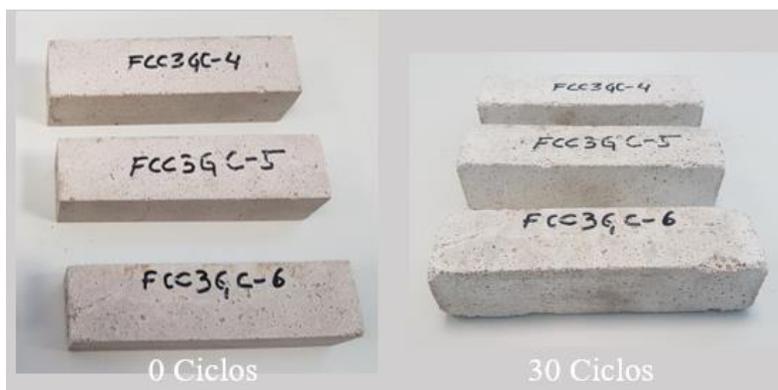
En la Figura 105 a), b) y c) podemos observar el aspecto físico del mortero control (FFC 00), el mortero elaborado con el 30 % de geopolímero comercial (FCC 30GCOM) y el mortero elaborado con el 30 % de geopolímero a partir de CCA (FCC 30GRES) respectivamente. Al lado izquierdo se muestra el inicio del ensayo y al lado derecho el estado de deterioro físico al final del ensayo, es decir terminado los 30 ciclos de hielo-deshielo. Y en la Figura 106 a) y b) se observa las probetas con el mortero elaborado con el 30 % de geopolímero a partir de la tierra diatomea natural (FCC 30GTDN) y 30 % del geopolímero a partir del residuo de la tierra diatomea proveniente del filtrado de cerveza (FCC 30GTDR) respectivamente.

## ENSAYOS DE DURABILIDAD

---



a) Mortero control FCC 00

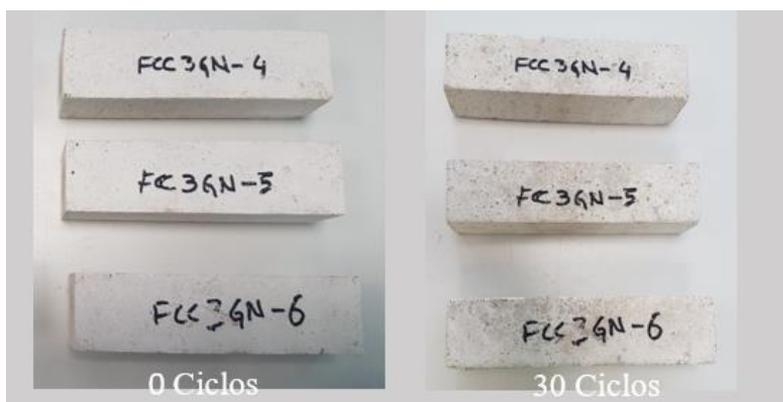


b) Mortero FCC 30GCOM

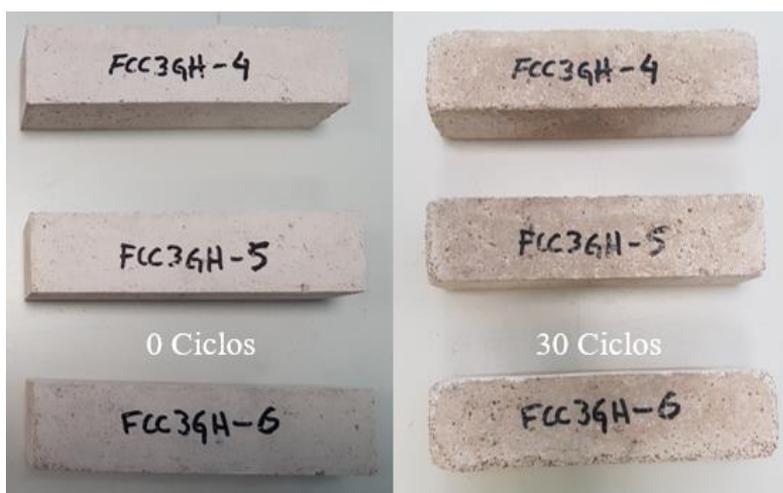


c) Mortero FCC 30GRES

Figura 105 Estado inicial y final de las probetas cal/FCC y geopolímeros I



a) Mortero FCC 30GTDN



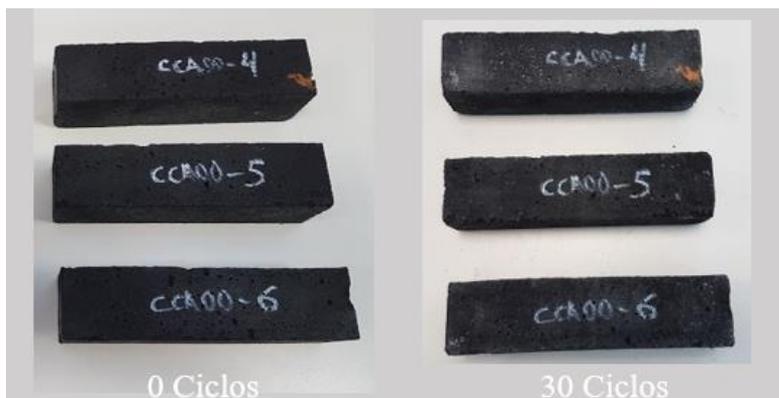
b) Mortero FCC 30GTDR

Figura 106 Estado inicial y final de las probetas cal/FCC y geopolímeros II

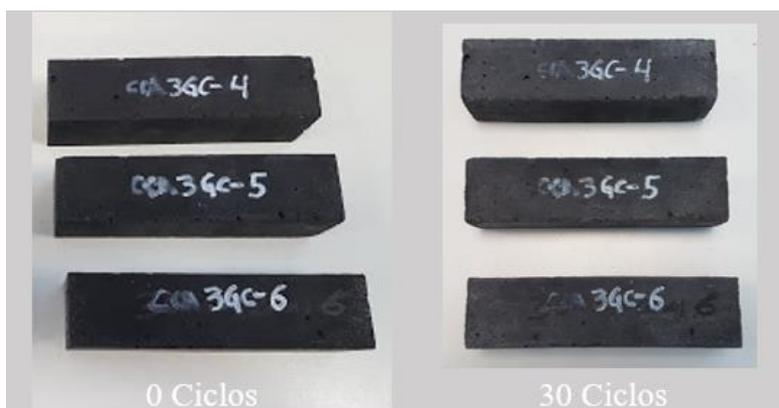
En la Figura 107 y 108 podemos observar el aspecto físico a los 0 y 30 ciclos de hielo-deshielo para el mortero control y los morteros mixtos cal/CCA elaborado con el 30 % de sustitución de los diferentes geopolímero utilizados en la presente tesis.

## ENSAYOS DE DURABILIDAD

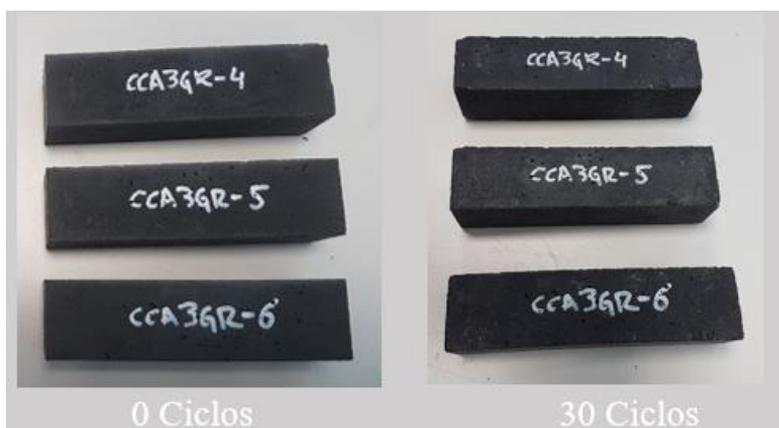
---



a) Mortero control CCA 00

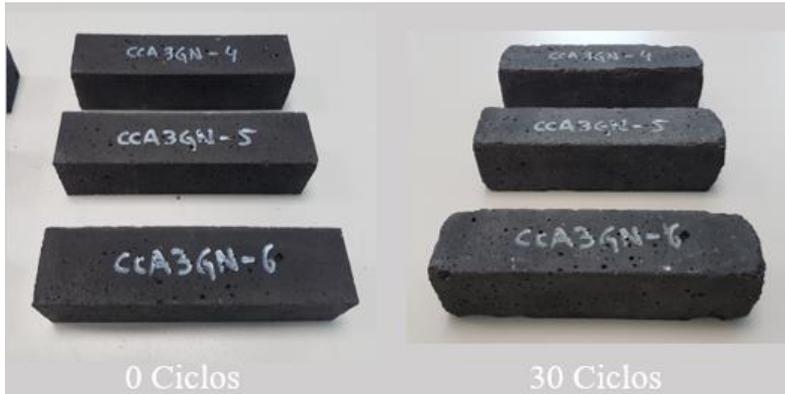


b) Mortero CCA 30GCOM

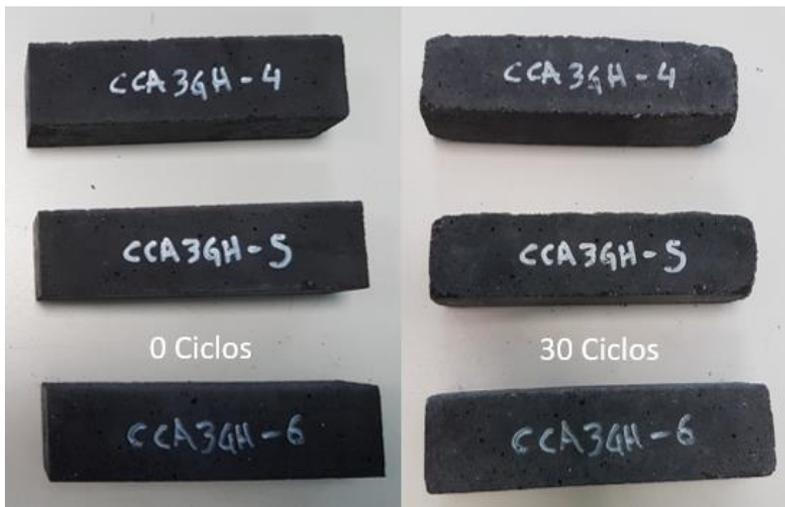


c) Mortero CCA 30GRES

Figura 107 Estado inicial y final de las probetas cal/CCA y geopolímeros I



a) Mortero CCA 30GTDN



b) Mortero CCA 30GTDR

Figura 108 Estado inicial y final de las probetas cal/CCA y geopolímeros II

En la Figura 109 a) podemos observar el aspecto físico al inicio para el mortero control cal/CLD, b) mortero elaborado con el 30 % de geopolímero comercial (CLD 30GCOM) y c) mortero el 30 % de geopolímero elaborado a partir de CCA (CLD 30GRES).

## ENSAYOS DE DURABILIDAD

---



a) Mortero control CLD 00



b) Mortero CLD 30GCOM



c) Mortero CLD 30GRES

Figura 109 Estado inicial y final de las probetas cal/CLD y geopolímeros

En las Figuras 105-109, se observa que el daño físico provocado por este ensayo que se traduce en pérdida de masa, aparición de micro fisuras, descascaramiento de las superficies, aristas irregulares y variación del color, lo que significa que todos los morteros mixtos han modificado su aspecto externo inicial, independiente del tipo de geopolímero y la puzolana utilizada. Pero son los morteros cal/CLD los que presentaban peor daño físico respecto de las otras puzolanas.

En algunos estudios sobre morteros de cal y cal/puzolana, se mejora el tiempo de exposición a los ciclos de hielo y deshielo utilizando diferentes superplastificantes, aditivos, sin embargo, se debe tener cuidado al seleccionar para determinar la mejor compatibilidad con estos materiales ya que pueden tener un efecto nocivo sobre los morteros de cal.

Duran et al. [149] utilizaron dos superplastificantes que son el sulfonato de polinaftaleno (PNS) y lignosulfonato (LS) en sistemas cal/MK con árido calizo. La durabilidad (ciclos hielo-deshielo) de los morteros mejoró notablemente tras la incorporación de metacaolín y empeoró tras la adición de LS. La presencia de metakaolin hace que se formen matrices más durables debido a la formación de silicatos y silicoaluminatos cálcicos hidratados de mayor resistencia que los morteros que contienen únicamente cal.

Silva et al. [150] estudiaron el efecto de 3 agentes tensioactivos para morteros de cal aérea en el comportamiento a los ciclos hielo-deshielo. Los tres agentes empleados fueron el dodecil sulfato de sodio (SDS), alfa olefina sulfonato de sodio (AOS) y cocamidopropil betaína (CAPB), los resultados mostraron que el CAPB tuvo la mayor acción para incorporar

## ENSAYOS DE DURABILIDAD

---

aire de los tres. Dicha capacidad se atribuye a su naturaleza anfótera, la incorporación del mismo produce una reducción en su resistencia mecánica y la presencia de una mayor porosidad, haciendo que los morteros sean más susceptibles a la degradación hielo-deshielo. Por el contrario, SDS y AOS solo provocaron cambios moderados en los morteros de cal, pero mejoraron su resistencia a los ciclos hielo-deshielo. Izaguirre et al. [147], recomienda el oleato de sodio como el aditivo más eficaz para soportar los procesos de congelación para los morteros de cal, tras evaluar la resistencia al envejecimiento y la durabilidad empleando aditivos.

### 4.5 Propuesta de la vivienda de bajo coste

Ante los problemas asociados a la vivienda en países en desarrollo descritos en el apartado 1.2, y gracias a ADSIDEO-COOPERACIÓN, programa comprometido con el desarrollo humano y la lucha contra la pobreza se pudo conseguir financiación para la presente investigación. Uno de los objetivos de la ayuda concedida contemplaba la creación de un prototipo con las mezclas ensayadas que pueda ser útil en la construcción de viviendas de bajo coste. El proyecto al cual nos referimos lleva por título: “Reutilización de residuos agrícolas e industriales para la fabricación de conglomerantes sostenibles en países en desarrollo”. El propósito de este último punto de la investigación es el desarrollar la rasilla geopolimérica como una posible aplicación práctica de los nuevos conglomerantes desarrollados en esta investigación.

Con la elaboración de la rasilla geopolimérica se propone recuperar la construcción tabicada que es un sistema constructivo tradicional español, siendo esta una alternativa para la construcción de viviendas sociales en el Estado Plurinacional de Bolivia que podría reducir el déficit habitacional que actualmente tiene esta zona y mejorar la calidad de vida de las personas vulnerables, debido a que este sistema constructivo tiene mejores características técnicas, económicas, sostenibles, respecto de las viviendas que en la actualidad se están construyendo en Bolivia, cuya característica típica es la de una vivienda de una o dos plantas como altura máxima, y las luces entre muros de 4 o 6 metros.

## RASILLA GEOPOLIMÉRICA

---

Se denomina bóveda tabicada a la construcción realizada mediante la superposición de por lo menos dos capas de rasillas cerámicas puestas con la tabla tangente a la directriz de la bóveda, las rasillas se configuran a rompejuntas respecto de las anteriores, la colocación de la primera capa es la que exige mayor experiencia en el operario que mediante el uso de un mortero de fraguado rápido se va armando las configuraciones de la rasilla según el tipo de bóveda que está construyendo. Entre las principales ventajas de este sistema constructivo podemos mencionar: a) gran economía en la puesta en obra, si el operario es experto no necesita de ninguna cimbra, solo en el caso que tenga una forma compleja requiere de una plantilla que sirve de guía; b) ligero con relación a su capacidad portante, al ser de menor peso puede reducir los empujes laterales; c) no requiere de armadura de refuerzo como un forjado convencional, d) capacidad ilimitada de generar formas.

Muchos edificios industriales (1860 - 1880) construidos en los alrededores de Barcelona usan esta técnica, estos diseños fueron obra del arquitecto Valenciano Rafael Guastavino quien dio a conocer esta técnica a nivel internacional cuando emigro a los EEUU en 1881 y fundo R. Guastavino Company, llegando a construir más de mil edificios en ciudades como Nueva York, Boston, Pittsburg y en otros países como México y Canadá.

Las bóvedas tabicadas sean catalanas, valencianas, rosellonesas, extremeñas o de cualquier otro origen que todavía existen en el patrimonio arquitectónico español se deben preservar por encima de cualquier razón, es por ello que en la actualidad se están realizando experimentos a escala contrastados con modelos teóricos desarrollados por el método de elementos finitos para justificar la bondad de su

funcionamiento estructural, mediante pruebas de carga y estudiando los posibles daños que generan en ellas y aprender más sobre el conocimiento de estas estructuras para dar soluciones a las patologías que están presentando los edificios históricos cuyas intervenciones son difíciles de llevar a cabo debido a la falta de más estudios sobre esta técnica constructiva y al no disponer la mano de obra cualificada con suficiente experiencia.

Tal es el caso de la construcción de una bóveda de mampostería que probablemente sea la primera vez que una bóveda de crucería de mampostería a gran escala, ha sido sometida a una serie de asentamientos cíclicos en uno de sus soportes, simulando un asentamiento del suelo, la investigación fue llevada a cabo en los laboratorios del ICITECH de la Universitat Politècnica de Valencia (España) con la esperanza que los resultados sean de gran interés para la comunidad científica, los profesionales y las partes interesadas que trabajan en este campo [151].

Se trata una bóveda de cuatro arcos laterales de sección semicircular de 3,6 m construidos sobre unas guías metálicas provisionales, en la Figura 110 podemos apreciar las fases constructivas, la bóveda se construyó siguiendo el método tradicional de las bóvedas de pandero españolas.

Se utilizaron rasillas cerámicas con dimensiones iguales a 230x110x26 mm<sup>3</sup>, la primera capa de rasillas se utilizó como encofrado para las siguientes capas, gracias al revoque de yeso de secado rápido [152].

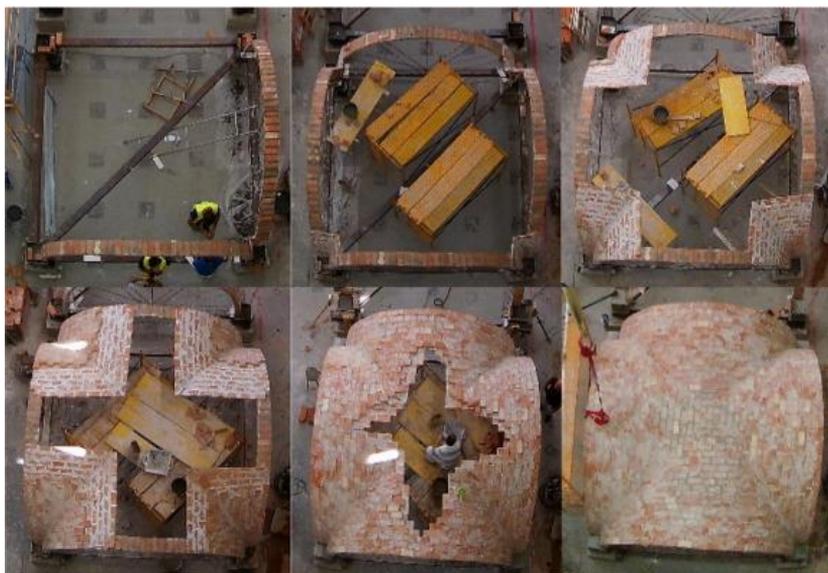


Figura 110 Fases constructivas de la bóveda [152]

Antes de someterlo al ensayo experimental, mediante un modelo numérico de elementos finitos se ha simulado la bóveda para predecir la posible falla de la estructura, pero previamente se hizo ensayos preliminares para identificar las propiedades mecánicas del material de mampostería adoptado para construir la bóveda, del cual podemos hacer referencia a la probeta realizada para determinar la resistencia a la compresión, obteniendo valores de 9 a 10 MPa a los 28 días de curado, tal como se podemos observar en la Figura 111.

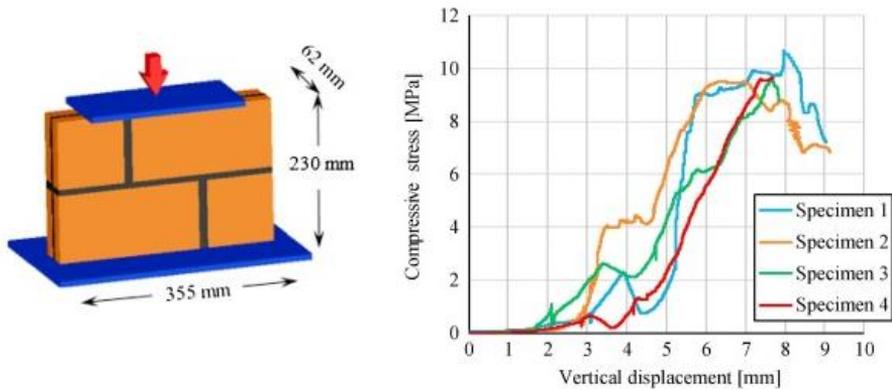


Figura 111 Montaje para la prueba a compresión y resultados del ensayo [151]

Para validar el comportamiento mecánico de la rasilla geopolimérica, se ha tratado de reproducir las condiciones experimentales para las rasillas cerámicas realizadas para la probeta sometida a compresión descrita en el estudio de Torres et al. [151]. Por ello se fabricaron 4 probetas con características similares.

En la fabricación de la rasilla geopolimérica se utilizó para la mezcla cal/puzolana el FCC como puzolana y para el geopolímero se decidió utilizar uno que tuviera una fuente de sílice residual. El geopolímero escogido fue el 30 % de geopolímero activado a partir de cascara de arroz (FCC 30GRES). Cabe destacar que se aumentó la relación agua/binder de 0,8 a 0,9 para no tener problemas con la trabajabilidad. Para el mortero de cemento que se utiliza para realizar la unión entre las 2 capas de rasillas se empleó una relación agua/binder de 0,5 y binder/árido de 1/4, el cemento se identificó como CEMI- 42,5 MPa. Se utilizó también yeso de construcción cuya relación agua/yeso fue de 0,4. La unión de las juntas en las rasillas geopoliméricas para la primera capa se utilizó yeso de construcción, y mortero de cemento para la segunda capa, ambas capas se juntaron con mortero de cemento.

## RASILLA GEOPOLIMÉRICA

Así mismo, se ha tomado muestras durante la fabricación de las probetas para obtener la resistencia a la compresión individual de los materiales que constituyen la probeta, los resultados se muestran en la Tabla 33, cada valor representa la media aritmética de 6 probetas estándar (40x40x160 mm<sup>3</sup>) y fueron curadas durante 28 días. En el cual podemos observar que el mortero para elaborar la rasilla geopolimérica tiene el menor valor a la resistencia a la compresión respecto de los demás constituyentes.

Tabla 33 Resistencia a la compresión de los constituyente de las 4 probetas

Rc del Yeso [MPa]	Rc del Cemento [MPa]	Rc de la rasilla[MPa]
18,64	29,50	17,16

En la Figura 112 podemos observar la probeta hecha de rasillas geopoliméricas y el sistema experimental para la rotura a compresión de la probeta.



Figura 112 Probeta con rasillas geopoliméricas

En la Tabla 34 podemos observar los valores obtenidos tras el ensayo los cuales se comparan con los valores obtenidos por Torres et al [151] utilizando rasillas cerámicas.

Tabla 34 Comparación de la Rc para los 2 tipos de rasillas

	Resistencia a la compresión [MPa] de la rasilla cerámica*	Resistencia a la compresión [MPa] de la rasilla geopolimérica
Muestra 1	10,5	10,0
Muestra 2	9,5	10,0
Muestra 3	9,5	12,2
Muestra 4	9,7	14,5
Promedio	<b>9,8</b>	<b>11,7</b>

\* Datos del estudio de Torres et al [151]

Con los resultados obtenidos de la rasilla geopolimérica como integrante de la probeta sometida a compresión, se ha demostrado que, si es posible sustituir la rasilla cerámica por la rasilla geopolimérica para la construcción tabicada, siendo que esta tiene un comportamiento similar o mayor que la probeta de rasilla cerámica, siendo el promedio de 11,7 MPa en la resistencia a la compresión.

En el Anexo III proponemos el diseño de una vivienda de bajo coste, siendo esta una alternativa entre las diferentes posibilidades que nos ofrece la construcción tabicada para construcciones de mínima altura.

## **CAPÍTULO V**

**--\_ Conclusiones y Futuras  
líneas de investigación \_--**

### 5 CONCLUSIONES

Tras el estudio del geopolímero comercial y los geopolímeros alternativos provenientes de residuos en los morteros de cal/puzolana, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- El efecto positivo de añadir pequeñas cantidades de geopolímero sobre el sistema cal/puzolana fue notable, debido a que este potenció la formación de los nuevos productos de reacción.
- Los valores de resistencia a la compresión de los sistemas mixtos son alrededor de 7 veces superiores a los valores de resistencia de los morteros cal/puzolana en 1 día de curado, tal es el caso de los morteros con un 30 % de geopolímero elaborado partir de CCA que sustituyendo a las mezclas cal/ FCC y cal/CCA obtuvieron 14,83 y 8,19 MPa respectivamente, a diferencia de los morteros control cal/FCC y cal/CCA que obtuvieron 1,43 y 0,19 MPa respectivamente.
- Para los morteros cal/FCC-geopolímero los mejores resultados sobre la resistencia a la compresión se dan dentro el rango de 20 - 40 % de sustitución de la mezcla cal/FCC en peso por el geopolímero.
- En los morteros cal/CCA-geopolímero los rangos óptimos de sustitución están dentro el intervalo 30 - 50 %.
- En los morteros cal/CLD también necesitan porcentajes de sustituciones mayores al 30 % de dicha mezcla por geopolímero.

## CONCLUSIONES

---

- Las sustituciones del silicato sódico comercial por soluciones de ceniza de cascara de arroz-NaOH, tierra diatomea natural-NaOH y tierra diatomea residual-NaOH, en el diseño de mezcla de compuestos geopoliméricos a base del catalizador gastado de craqueo catalítico, tienen características similares o mejores a las del estándar ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).
- Tener mejores comportamientos con los geopolímeros alternativos obtenidos a partir de la CCA, TDN y TDR significa reducir costes energéticos y ser más amigables con el medioambiente.
- Las observaciones mediante SEM nos han mostrado la formación de matrices más densas cuando se utiliza el geopolímero comercial o el alternativo, además de la formación de los geles de hidratación (SCH, SACH, ACH) derivados de la reacción puzolánica con la cal, junto a los NASH o C(N)ASH de la reacción geopolimérica y la posible formación de estructuras zeolíticas. Estos resultados fueron confirmados también por los estudios de termogravimetría de las diferentes pastas cal/puzolana-geopolímero.
- En temas de durabilidad la presencia del geopolímero mejora los coeficientes de absorción de agua por capilaridad, obteniendo los valores menores para los geopolímeros con activadores alternativos.
- La presencia de geopolímero en los morteros mixtos mejora el tiempo de exposición frente a los ensayos de degradación de los ciclos hielo-deshielo

- En cuanto a la búsqueda de un prototipo que pueda emplear este tipo de morteros mixtos, se ha encontrado que la rasilla geopolimérica puede remplazar a la tradicional rasilla cerámica, por tener comportamientos similares, adicionalmente no requiere altas temperaturas para su fabricación haciéndoles más sostenible y promoviendo los principios de la economía circular.

De esta manera y en función de los resultados obtenidos a partir de la búsqueda para mejorar las propiedades en los morteros cal/puzolana de la presente tesis doctoral y a modo de conclusión general se podría indicar que se ha demostrado que la utilización de estos morteros mixtos es útil en sistemas constructivos para aplicaciones donde se necesiten resistencias medias desde las primeras edades de curado. Estas nuevas mezclas presentan un bajo coste económico y medio ambiental, y abre puertas para posibles aplicaciones que pueden adaptarse a los contextos de vulnerabilidad en países de América latina, sobre todo teniendo en cuenta que los residuos y los materiales utilizados en la presente tesis están disponibles en estos lugares.

### 5.1 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como futuras líneas de investigación y con el objetivo de mejorar y hacer accesible el empleo de los nuevos conglomerantes dentro el campo de la construcción, a continuación, se presentan unas posibles líneas de investigación para dar continuidad al presente trabajo.

- Realizar estudios de la distribución del tamaño de los poros mediante porosimetría de intrusión de mercurio u otra técnica, para determinar la influencia de los geopolímeros en las matrices cal/puzolana.
- Variar el tipo de árido empleado, como los áridos reciclados, los áridos de origen calizo, siendo este último objeto de estudios por parte de otros investigadores donde se ha reportado un mejor comportamiento respecto de un árido de origen silíceo en los morteros de cal.
- Buscar aditivos o tensioactivos que puedan ser compatibles con los morteros cal/puzolana-geopolímero, para aumentar el tiempo de exposición frente a los ensayos de los ciclos hielo-deshielo y que no tengan un efecto nocivo en los mismos. También tratamientos hidrofugantes en probetas en estado seco.
- Realizar más ensayos referentes a la durabilidad de los morteros mixtos, tal es el caso del ataque con ácidos o ataque con sulfatos entre otros.

## FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

---

- Estudios de carbonatación acelerada con el fin de entender el proceso de incorporar geopolímeros a una matriz cal/puzolana, porque aparte de la formación de los geles de hidratación, una parte del  $\text{Ca(OH)}_2$  también aparentemente se va carbonatar durante la hidratación debido al  $\text{CO}_2$ .

## --\_ BIBLIOGRAFÍA \_--

### 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. H. Brundtland, “Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común,” Doc. las Nac. Inf. la Com. Mund. sobre el Medio Ambient. y el Desarro., p. 416, 1987.
- [2] S. Fukuda-Parr, N. Birdsall, and J. Sachs, “Los Objetivos de Desarrollo del Milenio: Un pacto entre las naciones para eliminar la pobreza humana,” Phønix-Trykkeret A/S, Aarhus (Dinamarca), New York, 10017, EE.UU., 2003.
- [3] Naciones Unidas. ONU, “Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible,” Web Page. p. 1, 2017.
- [4] UN-Habitat, “World Cities Report 2020, The Value of Sustainable Urbanization,” P.O. Box 30030, Nairobi, Kenya, 2020.
- [5] E. Moreno, B. Arimah, R. Otieno Otie, U. Mbeche-Smith, A. Klen-Amin, and M. Kamiya, “Urbanización y Desarrollo. Futuros emergentes,” 2016.
- [6] N. R. Libertun de Duren, “Why there? Developers’ rationale for building social housing in the urban periphery in Latin America,” *Cities*, vol. 72, no. October 2017, pp. 411–420, 2018.
- [7] ONU-Habitat, “Vivienda y ODS en México,” ONU, p. 460, 2018.
- [8] P. Conceição, “Informe sobre Desarrollo Humano,” 2019.
- [9] Rodney Pereira Maldonado, Ernesto Yáñez Aguilar, Elizabeth Jiménez Zamora, Huascar Mantilla Gutiérrez, and Alejandro Romero Merlo, “Análisis del empleo en Bolivia Calidad, sector gremial y actores.” La Paz, Bolivia, 2018.

- [10] R. Vargas and W. Apaza, “El nuevo rostro de Bolivia. Transformación y Metropolización,” Primera, p. 286, 2015.
- [11] S. Attria, “Net Zero Energy Buildings (NZEB): Concepts, Frameworks and Roadmaps for Project Analysis and Implementation.” Elsevier, Amsterdam, The Netherland, p. 400, 2018.
- [12] AEICE, “Estrategias para Edificios de energia Casi Nula,” Valladolid, España, 2018.
- [13] Comisión Europea, “Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios,” Bol. Of., vol. L135, pp. 13–35, 2010.
- [14] U.S. Geological Survey, Mineral commodity summaries 2020, no. 703. 2020.
- [15] Z. Cao, L. Shen, A. N. Løvik, D. B. Müller, and G. Liu, “Elaborating the History of Our Cementing Societies: An in-Use Stock Perspective,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 19, pp. 11468–11475, 2017.
- [16] P. J. M. Monteiro, S. A. Miller, and A. Horvath, “Towards sustainable concrete,” *Nat. Mater.*, vol. 16, no. 7, pp. 698–699, 2017.
- [17] R. Kajaste and M. Hurme, “Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 4041–4052, 2016.
- [18] R. Maddalena, J. J. Roberts, and A. Hamilton, “Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements,” *J. Clean. Prod.*, vol. 186, pp. 933–942, 2018.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [19] S. A. Miller and R. J. Myers, “Environmental Impacts of Alternative Cement Binders,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, no. 2, pp. 677–686, 2020.
- [20] J. Payá, J. Monzó, M. V. Borrachero, L. Soriano, J. L. Akasaki, and M. M. Tashima, “New inorganic binders containing ashes from agricultural wastes,” in *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites*, Elsevier Inc., 2017, pp. 127–164.
- [21] E. Aprianti, P. Shafigh, S. Bahri, and J. N. Farahani, “Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes - A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 74. Elsevier Ltd, pp. 176–187, 15-Jan-2015.
- [22] I. Gárate Rojas, “Artes de la Cal.” Instituto Español de Arquitectura de la Universidad de Alcalá, Madrid, España, 2002.
- [23] J. I. Álvarez Galindo, A. Martín Pérez, and P. J. García Casado, “Historia de los morteros,” *Rev. PH*, no. 13, p. 52, 1995.
- [24] J. Pires, “Simple analysis of historical lime mortars,” *J. Chem. Educ.*, vol. 92, no. 3, pp. 521–523, 2015.
- [25] A. Dowling, J. O’Dwyer, and C. C. Adley, “Lime in the limelight,” *J. Clean. Prod.*, vol. 92, pp. 13–22, 2015.
- [26] UNE-EN 459-1, Cales para la Construcción Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. España: AENOR, 2010.
- [27] T. E. L. Association, “The European Lime Association,” 2016.
- [28] J. L. Deventer and J. S. J. . Van, “Alcali Activated Materials.” 2014.

- 
- [29] F. Puertas, “Cementos de escorias activadas alcalinamente: Situación actual y perspectivas de futuro,” España, 1995.
- [30] C. Shi and A. Fernández-Jiménez, “Stabilization/solidification of hazardous and radioactive wastes with alkali-activated cements,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 137, no. 3, pp. 1656–1663, Oct. 2006.
- [31] J. Davidovits, *Geopolymer: Chemistry and Applications*, 2nd ed. France: Saint Quentin, 2008.
- [32] J. Rivera, F. Castro, A. Fernández-Jiménez, and N. Cristelo, “Alkali-Activated Cements from Urban, Mining and Agro-Industrial Waste: State-of-the-art and Opportunities,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 1, p. 3, Apr. 2020.
- [33] C. Shi, A. F. Jiménez, and A. Palomo, “New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 750–763, 2011.
- [34] F. Pacheco, J. Torgal, A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, and P. Chindapasirt, *Handbook Of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Woodhead Publishing., 2015.
- [35] N. Bouzón Orgeira, “Activadores Alcalinos Alternativos a partir de La Ceniza de Cáscara de Arroz para La Fabricación de Geopolímeros,” Universidad Politécnica de Valencia - España, 2015.
- [36] L. K. Turner and F. G. Collins, “Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 125–130, Jun. 2013.
- [37] M. Torres-Carrasco, C. Rodríguez-Puertas, M. Del Mar Alonso, and F. Puertas, “Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour,” *Bol. la Soc. Esp.*

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Ceram. y Vidr., vol. 54, no. 2, pp. 45–57, Mar. 2015.
- [38] N. Bouzón, J. Payá, M. V. Borrachero, L. Soriano, M. M. Tashima, and J. Monzó, “Refluxed rice husk ash/NaOH suspension for preparing alkali activated binders,” *Mater. Lett.*, vol. 115, pp. 72–74, 2014.
- [39] J. M. Mejía, R. Mejía de Gutiérrez, and F. Puertas, “Ceniza de cascarilla de arroz como fuente de sílice en sistemas cementicios de ceniza volante y escoria activados alcalinamente,” *Mater. Constr.*, vol. 63, no. 311, pp. 361–375, 2013.
- [40] M. Torres-Carrasco and F. Puertas, “La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros,” *Rev. Ing. Constr.*, vol. 32, no. 2, pp. 5–12, Aug. 2017.
- [41] A. Font et al., “Use of residual diatomaceous earth as a silica source in geopolymer production,” *Mater. Lett.*, vol. 223, pp. 10–13, Jul. 2018.
- [42] J. C. B. Moraes et al., “New use of sugar cane straw ash in alkali-activated materials: A silica source for the preparation of the alkaline activator,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 171, pp. 611–621, 2018.
- [43] O. Mahmoodi, H. Siad, M. Lachemi, S. Dadsetan, and M. Sahmaran, “Development of normal and very high strength geopolymer binders based on concrete waste at ambient environment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 279, p. 123436, Jan. 2021.
- [44] J. M. Terrones-Saeta, J. Suárez-Macías, F. J. Iglesias-Godino, and F. A. Corpas-Iglesias, “Development of geopolymers as substitutes for traditional ceramics for bricks with chamotte and

- biomass bottom ash,” *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 1, pp. 1–20, Jan. 2021.
- [45] L. Simão, D. Hotza, M. J. Ribeiro, R. M. Novais, O. R. K. Montedo, and F. Raupp-Pereira, “Development of new geopolymers based on stone cutting waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 257, p. 119525, Oct. 2020.
- [46] V. M. Malhotra and P. K. Mehta, *Pozzolanic and Cementitious Materials*, 1st ed. London: CRC Press, 1996.
- [47] E. Navrátilová and P. Rovnaníková, “Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars,” *Construction and Building Materials*, vol. 120. Elsevier Ltd, pp. 530–539, 01-Sep-2016.
- [48] M. Juenger et al., “Supplementary Cementitious Materials for Concrete: Characterization Needs,” *MRS Proc.*, vol. 1488, 2012.
- [49] F. Ferella, S. Leone, V. Innocenzi, I. De Michelis, G. Taglieri, and K. Gallucci, “Synthesis of zeolites from spent fluid catalytic cracking catalyst,” *J. Clean. Prod.*, vol. 230, pp. 910–926, Sep. 2019.
- [50] D. M. Considine, “Tecnología del petróleo.” México: D.F. Marcombo, 1988.
- [51] N. T. Castellanos and J. T. Agredo, “Uso del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como adición puzolánica - Revisión,” *Ing. e Investig.*, vol. 30, no. 2, pp. 35–42, 2010.
- [52] L. Soriano, “Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementante con residuo de catalizador de craqueo catalítico usado (FCC),” Universidad Politécnica de Valencia, 2007.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [53] K. C. Hsu, Y. S. Tseng, F. F. Ku, and N. Su, "Oil cracking waste catalyst as an active pozzolanic material for superplasticized mortars," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 12, pp. 1815–1820, Dec. 2001.
- [54] J. Payá, J. Monzó, M. V. Borrachero, and S. Velázquez, "Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 4, pp. 603–609, Apr. 2003.
- [55] A. Arizzi and G. Cultrone, "Comparing the pozzolanic activity of aerial lime mortars made with metakaolin and fluid catalytic cracking catalyst residue: A petrographic and physical-mechanical study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, pp. 382–390, Sep. 2018.
- [56] M. M. Tashima et al., "New geopolymeric binder based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC)," *Mater. Lett.*, vol. 80, pp. 50–52, Aug. 2012.
- [57] J. J. Trochez, R. M. De Gutiérrez, J. Rivera, and S. A. Bernal, "Synthesis of geopolymer from spent FCC : Effect of," vol. 65, no. 317, 2015.
- [58] E. D. Rodríguez et al., "Geopolymers based on spent catalyst residue from a fluid catalytic cracking (FCC) process," *Fuel*, vol. 109, pp. 493–502, Jul. 2013.
- [59] A. Allahverdi, M. N. Shahrabaki, M. Ghezelasheghi, and M. Mahinroosta, "Sulfate resistance of RFCC spent catalyst-blended Portland cement," *Bol. la Soc. Esp. Ceram. y Vidr.*, vol. 58, no. 3, pp. 103–114, May 2019.

- 
- [60] S. Izquierdo, J. Diaz, R. Mejía De Gutiérrez, and J. Torres, “Durability of FCC-blended mortar exposed to sodium and magnesium sulfate,” *Rev. Ing. Constr.*, vol. 31, no. 3, pp. 183–190, 2016.
- [61] R. Neves, C. Vicente, A. Castela, and M. F. Montemor, “Durability performance of concrete incorporating spent fluid cracking catalyst,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 55, pp. 308–314, Jan. 2015.
- [62] L. Soriano, J. Payá, J. Monzó, M. V Borrachero, and M. M. Tashima, “High strength mortars using ordinary Portland cement-fly ash-fluid catalytic cracking catalyst residue ternary system (OPC/FA/FCC),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, pp. 228–235, 2016.
- [63] R. Taha, Z. Al-Kamyani, K. Al-Jabri, M. Baawain, and K. Al-Shamsi, “Recycling of waste spent catalyst in road construction and masonry blocks,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 229–230, pp. 122–127, Aug. 2012.
- [64] E. A. Caicedo-Caicedo, R. Mejía-De-Gutiérrez, M. Gordillo-Suárez, and J. Torres-Agreto, “Reutilización de un residuo de la industria petrolera (FCC) en la producción de elementos constructivos,” *Ing. y Univ.*, vol. 19, no. 1, pp. 135–154, 2015.
- [65] Fao, “[www.fao.org/economic/RMM/es](http://www.fao.org/economic/RMM/es) Rice-Network@fao.org,” 2018.
- [66] A. Muthadhi and S. Kothandaraman, “Optimum production conditions for reactive rice husk ash,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 43, no. 9, pp. 1303–1315, 2010.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [67] D. G. Nair, K. S. Jagadish, and A. Fraaij, “Reactive pozzolanas from rice husk ash: An alternative to cement for rural housing,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 6, pp. 1062–1071, Jun. 2006.
- [68] R. Méndez, M. V Borrachero, J. Payá, and J. Monzó, “Mechanical strength of lime-rice husk ash mortars: A preliminary study,” in *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 517, pp. 495–499.
- [69] N. Billong, U. C. Melo, E. Kamseu, J. M. Kinuthia, and D. Njopwouo, “Improving hydraulic properties of lime-rice husk ash (RHA) binders with metakaolin (MK),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 4, pp. 2157–2161, Apr. 2011.
- [70] S. Pavía, R. Walker, P. Veale, and A. Wood, “Impact of the Properties and Reactivity of Rice Husk Ash on Lime Mortar Properties,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 9, p. 04014066, 2014.
- [71] S. Pavía and M. Aly, “Influence of aggregate and supplementary cementitious materials on the properties of hydrated lime (CL90s) mortars,” *Mater. Constr.*, vol. 66, no. 324, pp. 1–10, 2016.
- [72] W. Rosanne and P. Sara, “Behaviour and Properties of Lime-Pozzolan Pastes,” in *8th International Masonry Conference*, 2017, no. September.
- [73] E. Kamseu et al., “Substitution of sodium silicate with rice husk ash-NaOH solution in metakaolin based geopolymer cement concerning reduction in global warming,” *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 3050–3060, Jan. 2017.
- [74] K. T. Tong, R. Vinai, and M. N. Soutsos, “Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders,” *J. Clean. Prod.*, vol. 201, pp. 272–286, Nov. 2018.

- 
- [75] C. L. Hwang and T. P. Huynh, "Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 1–9, Dec. 2015.
- [76] R. H. Geraldo, C. M. Ouellet-Plamondon, E. A. D. Muianga, and G. Camarini, "Alkali-activated binder containing wastes: A study with rice husk ash and red ceramic," *Ceramica*, vol. 63, no. 365, pp. 44–51, 2017.
- [77] R. H. Geraldo, L. F. R. Fernandes, and G. Camarini, "Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production," *J. Clean. Prod.*, vol. 149, pp. 146–155, Apr. 2017.
- [78] A. Font et al., "Design and properties of 100% waste-based ternary alkali-activated mortars: Blast furnace slag, olive-stone biomass ash and rice husk ash," *J. Clean. Prod.*, vol. 243, p. 118568, Jan. 2020.
- [79] R. P. Chauhan and A. Kumar, "Radon resistant potential of concrete manufactured using Ordinary Portland Cement blended with rice husk ash," *Atmos. Environ.*, vol. 81, pp. 413–420, Dec. 2013.
- [80] M. B. Ahsan and Z. Hossain, "Use of Rice Husk Ash (RHA) as a Sustainable Cementitious Material for Concrete Construction," Springer, Cham, 2018, pp. 197–210.
- [81] R. Siddique, *Waste Material and By-Products in Concrete*, vol. 53, no. 9. 2019.
- [82] G. Rodríguez De Sensale, "Strength development of concrete with rice-husk ash," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 2, pp. 158–160, Feb. 2006.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [83] G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, and E. De Moraes Rego Fairbairn, "Use of ultrafine rice husk ash with high-carbon content as pozzolan in high performance concrete," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 42, no. 7, pp. 983–992, Aug. 2009.
- [84] L. Fernando, K. Pemasiri, and B. Dassanayake, "Combined effects of rice husk ash and nylon fiber on engineering properties of cement mortar," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 1–9, Mar. 2020.
- [85] R. K. Sharma, "Effect of substitution of cement with rice husk ash on compressive strength of concrete using plastic fibres and super plasticizer," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 7, pp. 2138–2142, Oct. 2014.
- [86] V. Kannan and K. Ganesan, "Synergic Effect of Pozzolanic Materials on the Structural Properties of Self-Compacting Concrete," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 39, no. 4, pp. 2601–2609, Jan. 2014.
- [87] A. Adesina and P. Awoyera, "Overview of trends in the application of waste materials in self-compacting concrete production," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 9, pp. 1–18, Sep. 2019.
- [88] X. Liu, X. Chen, L. Yang, H. Chen, Y. Tian, and Z. Wang, "A review on recent advances in the comprehensive application of rice husk ash," *Research on Chemical Intermediates*, vol. 42, no. 2. Springer Netherlands, pp. 893–913, 01-Feb-2016.
- [89] T. Ahmad, K. Ahmad, and M. Alam, "Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept," *Journal of Cleaner Production*, vol. 124. Elsevier Ltd, pp. 1–13, 15-Jun-2016.
- [90] Eurostat, "Estadísticas sobre residuos - Statistics Explained," 2019.

- 
- [91] C. J. Lynn, R. K. Dhir, G. S. Ghataora, and R. P. West, “Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 767–779, Nov. 2015.
- [92] J. Payá, J. Monzó, M. V. Borrachero, and L. Soriano, “Sewage sludge ash,” in *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, Elsevier, 2018, pp. 121–152.
- [93] M. A. Tantawy, A. M. El-Roudi, E. M. Abdalla, and M. A. Abdelzaher, “Evaluation of the Pozzolanic Activity of Sewage Sludge Ash,” *ISRN Chem. Eng.*, vol. 2012, no. iv, pp. 1–8, 2012.
- [94] N. Wang et al., “Utilizing Different Forms of Waste Sludge in Eco-construction Material Production,” Springer, Singapore, 2019, pp. 271–303.
- [95] R. O. Yusuf, Z. Z. Noor, M. F. M. d. Din, and A. H. Abba, “Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete - A review,” *International Journal of Global Environmental Issues*, vol. 12, no. 2–4. Inderscience Publishers, pp. 214–228, 2012.
- [96] S. C. Pan, D. H. Tseng, C. C. Lee, and C. Lee, “Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 11, pp. 1749–1754, Nov. 2003.
- [97] D. Vouk, D. Nakic, N. Stirmer, and C. Cheeseman, “Influence of combustion temperature on the performance of sewage sludge ash as a supplementary cementitious material,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 20, no. 3, pp. 1458–1467, Jul. 2018.
- [98] P. de Azevedo Basto, H. Savastano Junior, and A. A. de Melo Neto, “Characterization and pozzolanic properties of sewage sludge ashes (SSA) by electrical conductivity,” *Cem. Concr.*

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Compos., vol. 104, p. 103410, Nov. 2019.
- [99] Y. fan Zhou, J. shan Li, J. xin Lu, C. Cheeseman, and C. S. Poon, “Recycling incinerated sewage sludge ash (ISSA) as a cementitious binder by lime activation,” *J. Clean. Prod.*, vol. 244, p. 118856, Jan. 2020.
- [100] Y. fan Zhou, J. shan Li, J. xin Lu, C. Cheeseman, and C. S. Poon, “Sewage sludge ash: A comparative evaluation with fly ash for potential use as lime-pozzolan binders,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 242, p. 118160, May 2020.
- [101] Centro de Cooperación al Desarrollo, *Adsideo-Cooperación Experiencias de Investigación para El Desarrollo Humano*. Universitat Politècnica de València, 2015.
- [102] J. Monzó, J. Payá, M. V. Borrachero, and E. Peris-Mora, “Mechanical behavior of mortars containing sewage sludge ash (SSA) and Portland cements with different tricalcium aluminate content,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 1, pp. 87–94, Jan. 1999.
- [103] F. C. Chang, J. D. Lin, C. C. Tsai, and K. S. Wang, “Study on cement mortar and concrete made with sewage sludge ash,” *Water Sci. Technol.*, vol. 62, no. 7, pp. 1689–1693, Oct. 2010.
- [104] M. Pérez-Carrión et al., “Potential use of sewage sludge ash (SSA) as a cement replacement in precast concrete blocks,” *Mater. Constr.*, vol. 64, no. 313, pp. 142–150, 2014.
- [105] F. Baeza-Brotons, P. Garcés, J. Payá, and J. M. Saval, “Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. application in concretes for the manufacture of blocks,” *J. Clean. Prod.*, vol. 82, pp. 112–124, Nov. 2014.

- 
- [106] C. J. Lynn, R. K. Dhir, and G. S. Ghataora, “Sewage sludge ash characteristics and potential for use in bricks, tiles and glass ceramics,” *Water Sci. Technol.*, vol. 74, no. 1, pp. 17–29, Jul. 2016.
- [107] R. K. Dhir, G. S. Ghataora, and C. J. Lynn, “Geotechnical Applications,” in *Sustainable Construction Materials*, Elsevier, 2017, pp. 185–207.
- [108] M. M. Tashima et al., “Compressive Strength and Microstructure of Alkali-Activated Blast Furnace Slag/Sewage Sludge Ash (GGBS/SSA) Blends Cured at Room Temperature,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 8, no. 5, pp. 1441–1451, Jul. 2017.
- [109] Z. Chen, J. S. Li, B. J. Zhan, U. Sharma, and C. S. Poon, “Compressive strength and microstructural properties of dry-mixed geopolymer pastes synthesized from GGBS and sewage sludge ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 182, pp. 597–607, Sep. 2018.
- [110] A. Tavares, A. Costa, F. Rocha, and A. Velosa, “Absorbent materials in waterproofing barriers, analysis of the role of diatomaceous earth,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 125–132, Jan. 2016.
- [111] J. Parkinson and R. Gordon, “Beyond micromachining: The potential of diatoms,” *Trends in Biotechnology*, vol. 17, no. 5. Elsevier Ltd, pp. 190–196, 01-May-1999.
- [112] E. J. Sierra, S. A. Miller, A. R. Sakulich, K. MacKenzie, and M. W. Barsoum, “Pozzolanic activity of diatomaceous earth,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 93, no. 10, pp. 3406–3410, Oct. 2010.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [113] K. Pimraksa and P. Chindapasirt, "Lightweight bricks made of diatomaceous earth, lime and gypsum," *Ceram. Int.*, vol. 35, no. 1, pp. 471–478, Jan. 2009.
- [114] R. A. Terreros Carranza, "Nuevos Materiales Conglomerantes A partir de Tierras de Diatomeas de Distinto Origen: Reactividad Puzolánica," *Universitat Politècnica de València*, 2017.
- [115] J. Li, W. Zhang, C. Li, and P. J. M. Monteiro, "Eco-friendly mortar with high-volume diatomite and fly ash: Performance and life-cycle assessment with regional variability," *J. Clean. Prod.*, vol. 261, p. 121224, Jul. 2020.
- [116] J. Li, W. Zhang, C. Li, and P. J. M. Monteiro, "Green concrete containing diatomaceous earth and limestone: Workability, mechanical properties, and life-cycle assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 223, pp. 662–679, Jun. 2019.
- [117] A. Font et al., "Use of residual diatomaceous earth as a silica source in geopolymer production," *Mater. Lett.*, vol. 223, pp. 10–13, Jul. 2018.
- [118] J. M. Mejía, R. Mejía De Gutiérrez, and C. Montes, "Rice husk ash and spent diatomaceous earth as a source of silica to fabricate a geopolymeric binary binder," *J. Clean. Prod.*, vol. 118, pp. 133–139, Apr. 2016.
- [119] T. Sinsiri, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, and P. Chindapasirt, "The effects of replacement fly ash with diatomite in geopolymer mortar," *Comput. Concr.*, vol. 9, no. 6, pp. 427–437, 2012.
- [120] K. Arbi, A. Palomo, and A. Fernández-Jiménez, "Alkali-activated blends of calcium aluminate cement and slag/diatomite," *Ceram. Int.*, vol. 39, no. 8, pp. 9237–9245, Dec. 2013.

- [121] R. Firdous, D. Stephan, and J. N. Y. Djobo, “Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics,” *Construction and Building Materials*, vol. 190. Elsevier Ltd, pp. 1251–1263, 30-Nov-2018.
- [122] UNE-EN 196-1, Método de ensayo de cementos; Parte 1 : Determinación de resistencias. AENOR, 2018.
- [123] UNE-EN 1015-3, Métodos de ensayo de morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). AENOR, 2007.
- [124] UNE-EN 1015-18, Métodos de ensayo de morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido. AENOR, 2003.
- [125] UNE-EN 12371, Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la resistencia a la heladicidad. AENOR, 2011.
- [126] A. R. Villca Pozo, “Utilización de Cementos Activados Alcalinamente para la Mejora de las Propiedades de Morteros Cal-Puzolana,” *Universitat Politècnica De València*, 2016.
- [127] J. Cosa, L. Soriano, M. V. Borrachero, L. Reig, J. Payá, and J. M. Monzó, “Influence of addition of fluid catalytic cracking residue (FCC) and the SiO<sub>2</sub> concentration in alkali-activated ceramic sanitary-ware (CSW) binders,” *Minerals*, vol. 8, no. 4, 2018.
- [128] A. Gameiro et al., “Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 45, pp. 264–271, 2014.
- [129] A. Bakolas and E. Aggelakopoulou, “Pozzolanic activity of natural pozzolan–lime pastes and physicommechanical characteristics,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 135, no. 6, pp. 2953–2961, 2019.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [130] S. Alonso and A. Palomo, “Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio,” *Mater. Lett.*, vol. 47, no. 1–2, pp. 55–62, Jan. 2001.
- [131] S. Alonso and A. Palomo, “Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide-metakaolin solid mixtures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 1, pp. 25–30, Jan. 2001.
- [132] M. L. Granizo, S. Alonso, M. T. Blanco-Varela, and A. Palomo, “Alkaline activation of metakaolin: Effect of calcium hydroxide in the products of reaction,” in *Journal of the American Ceramic Society*, 2002, vol. 85, no. 1, pp. 225–231.
- [133] I. García-Lodeiro, A. Fernández-Jiménez, and A. Palomo, “Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash-portland cement blends,” *Cement and Concrete Research*, vol. 52. Elsevier Ltd, pp. 112–122, 01-Oct-2013.
- [134] S. Velázquez, “Tesis doctoral: Aplicaciones del Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC) en la Preparación de Conglomerantes Hidráulicos. Estudio de sus Propiedades Puzolánicas,” *Universitat Politècnica de València*, 2002.
- [135] M. Frías, R. V. de la Villa, S. Martínez-Ramírez, L. Fernández-Carrasco, E. Villar-Cociña, and R. García-Giménez, “Multi-technique characterization of a fine fraction of cdw and assessment of reactivity in a cdw/lime system,” *Minerals*, vol. 10, no. 7, pp. 1–20, 2020.
- [136] S. Dueramae, W. Tangchirapat, P. Sukontasukkul, P. Chindaprasirt, and C. Jaturapitakkul, “Investigation of compressive strength and microstructures of activated cement free

- binder from fly ash-calcium carbide residue mixture,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 4757–4765, Sep. 2019.
- [137] R. C. Andrades, R. F. Neves, F. R. V. Diaz, and A. H. M. Júnior, “Influence of alkalinity on the synthesis of zeolite A and hydroxysodalite from metakaolin,” *J. Nano Res.*, vol. 61, pp. 51–60, 2020.
- [138] K. Mohammed Haneefa, S. Divya Rani, R. Ramasamy, and M. Santhanam, “Microstructure and geochemistry of lime plaster mortar from a heritage structure,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 538–554, 2019.
- [139] UNE-EN 459-2, Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. AENOR, 2011.
- [140] C. del Olmo Rodríguez, “Los morteros. Control de Calidad (Mortars, Quality Control),” España, 1994.
- [141] M. A. Villaquirán-Caicedo, “Studying different silica sources for preparation of alternative waterglass used in preparation of binary geopolymer binders from metakaolin/boiler slag,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 116621, Dec. 2019.
- [142] J. Payá, J. Monzó, M. V Borrachero, P. Serna, S. Velázquez, and L. M. Ordóñez, “EL FACTOR DE EFICACIA CEMENTANTE DE PUZOLANAS SILÍCEAS Y SILICOALUMINOSAS MUY REACTIVAS,” pp. 591–600, 2002.
- [143] M. Pavlíková et al., “Ternary blended binder for production of a novel type of lightweight repair mortar,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 6, pp. 1–15, 2019.
- [144] UNE-EN 998-2, Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería. AENOR.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [145] K. Beck and M. Al-Mukhtar, “Formulation and characterization of an appropriate lime-based mortar for use with a porous limestone,” *Environ. Geol.*, vol. 56, no. 3–4, pp. 715–727, Dec. 2008.
- [146] M. R. Veiga, A. Velosa, and A. Magalhães, “Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 318–327, Jan. 2009.
- [147] A. Izaguirre, J. Lanas, and J. I. Álvarez, “Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 7, pp. 1081–1095, Jul. 2010.
- [148] Y. Boffill, H. Blanco, I. Lombillo, L. Villegas, and C. Thomas, “Caracterización física y mecánica de los morteros de cal utilizados en la rehabilitación de edificios históricos por medio de ensayos no destructivos,” *Rehabend*, pp. 705–717, 2014.
- [149] A. Duran, J. Gozales, I. Navarro, R. Sirera, J. Fernandez, and J. Alvarez, “Estudio del comportamiento en estado endurecido de morteros de cal aérea con metacaolín y superplastificantes,” in *VI Jornadas FICAL*, 2018.
- [150] B. A. Silva, A. P. Ferreira Pinto, A. Gomes, and A. Candeias, “Suitability of different surfactants as air-entraining admixtures for lime mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 256, p. 118986, Sep. 2020.
- [151] B. Torres, E. Bertolesi, P. A. Calderón, J. J. Moragues, and J. M. Adam, “A full-scale timber cross vault subjected to vertical cyclical displacements in one of its supports,” *Eng. Struct.*, vol. 183, pp. 791–804, Mar. 2019.

- [152] B. Torres, E. Bertolesi, J. J. Moragues, P. A. Calderón, and J. M. Adam, “Experimental investigation of a full-scale timber masonry cross vault subjected to vertical settlement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 221, pp. 421–432, Oct. 2019.

--\_ ANEXOS \_--

## 7 ANEXOS

### ANEXO I Índice de figuras

Figura 1 Los 17 Objetivos de desarrollo sostenible .....	21
Figura 2 Población (%) que vive en pobreza multifuncional, 2018. Adaptada de [4] .....	22
Figura 3 Población urbana que vive en barrios marginales.....	24
Figura 4 Requisitos para considerar una vivienda adecuada [7] .....	25
Figura 5 Diferencia de ingresos económicos entre trabajadores bolivianos [9] .....	27
Figura 6 Personas bolivianas habitando en una vivienda inadecuada en el año 2012 .....	28
Figura 7 Producción de cemento en diferentes países. A partir de [14]	34
Figura 8 Economía circular aplicada al hormigón. Adaptada de [20]...	36
Figura 9 Espectro de DRX de un mortero histórico de cal [24] .....	38
Figura 10 Ciclo de la cal [22] .....	41
Figura 11 Producción de la cal en el mundo. A partir de [14] .....	42
Figura 12 Clasificación de Cales de Construcción. A partir de [26].....	44
Figura 13 Resumen de los principales mercados de la cal. Adaptada de [27] .....	46
Figura 14 Modelo descriptivo de la activación alcalina de materiales silicoaluminosos [33].....	51
Figura 15 Proceso de fabricación del silicato de sodio comercial [37].	53
Figura 16 Curvas DTG de las zonas externas (ex) e internas (in) [55].	58

## ANEXOS I

---

Figura 17 Resistencia mecánica para geopolímeros basados en FCC [56] .....	60
Figura 18 Producción mundial de arroz [65].....	62
Figura 19 Dónde: a) Contenido de sílice soluble y b) Rc de morteros cal/CCA [67] .....	63
Figura 20 Rc de los morteros cal/CCA-MK [69] .....	65
Figura 21 Porcentaje de absorción de agua de los morteros cal/CCA-MK [69] .....	66
Figura 22 Tiempo de fraguado de una pasta mixta de cal/CCA [70] ....	67
Figura 23 Influencia de la superficie específica y el ratio cal: puzolana sobre la demanda de agua [72] .....	69
Figura 24 Influencia del tiempo de reflujo en la resistencia de los morteros [38] .....	70
Figura 25 Porcentaje de absorción de agua en función del contenido de silicato sódico alternativo [73] .....	71
Figura 26 Rc de las pastas: a) PC/CLD y b) cal/CLD [99] .....	79
Figura 27 Espectros XRD de 30 % (a) pastas de cal viva (b) cal hidratada [100] .....	80
Figura 28 Resistencia a la compresión de morteros de cal/puzolana [101] .....	81
Figura 29 Clasificación de la morfología de diatomeas [111].....	83
Figura 30 Absorción de agua por capilaridad de los morteros cal y TD [110] .....	85
Figura 31 Rc de los morteros PC-TD-FA-cal [115] .....	87
Figura 32 Rc de morteros con los 4 tipos de diatomea [117] .....	88
Figura 33 a) tiempo inicial de fraguado y b) Rc de los diferentes sistemas [118] .....	89

---

Figura 34 Equipo y materiales usados para la preparación de la disolución activadoras con reactivos comerciales.....	104
Figura 35 Equipo y materiales usados para la preparación de las disoluciones alcalinas con fuente de sílice alternativa .....	106
Figura 36 Equipo para la elaboración de pastas .....	107
Figura 37 Equipo y materiales usados en la preparación de morteros	109
Figura 38 Mesa de sacudidas para el ensayo de consistencia.....	111
Figura 39 Prensa modelo Instron 270.....	112
Figura 40 Equipo de medida de la resistencia a flexotracción .....	113
Figura 41 Prueba de absorción de agua por capilaridad.....	115
Figura 42 Esquema de los ensayos hielo-deshielo .....	116
Figura 43 Equipo de fluorescencia de rayos X.....	117
Figura 44 Equipo de granulometría por difracción laser.....	119
Figura 45 Equipo de Termogravimetría TGA 850 Mettler-Toledo.....	121
Figura 46 Difractómetro de rayos X.....	122
Figura 47 Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM).....	125
Figura 48 Cámara climática INELTEC .....	126
Figura 49 Distribución granulométrica del FCC .....	129
Figura 50 Difractograma del FCC (J-Faujasita, Q-Cuarzo, M-Mullita, B-Albita).....	130
Figura 51 Micrografía del FCC a 2000 aumentos .....	131
Figura 52 Distribución granulométrica de la CCA.....	132
Figura 53 Difractograma de la CCA (Q-Cuarzo, T-Tridimita, S-Silvina) .....	133
Figura 54 Micrografía de la CCA a 2000 aumentos.....	134
Figura 55 Distribución granulométrica de la CLD.....	134

## ANEXOS I

---

Figura 56 Difractograma del CLD (Q-Cuarzo, A-Anhidrita, L-óxido de calcio, P-Portlandita, H-Hidroxiapatito, F-Forsterita, B-Albita).....	136
Figura 57 Micrografía de la CLD a 4000 aumentos.....	137
Figura 58 Distribución granulométrica de la TDN.....	137
Figura 59 Difractograma de la TDN (R-Cristobalita, Q-Cuarzo, K-Caolinita).....	139
Figura 60 Micrografía de la TDN a 2000 aumentos.....	140
Figura 61 Distribución granulométrica de TDR.....	141
Figura 62 Difractograma de TDR (Q-Cuarzo, R-Cristobalita, N-Anortita).....	142
Figura 63 Micrografía de TDR a 2000 aumentos.....	142
Figura 64 DTG para la pasta control FCC 00 y 100 % geopolímero comercial.....	145
Figura 65 DTG para las pastas cal/FCC-geopolímero comercial.....	148
Figura 66 DTG para las pastas cal/FCC-geopolímero a partir de CCA.....	150
Figura 67 DTG para las pastas cal/FCC-geopolímero a partir de TDN.....	151
Figura 68 DTG para las pastas cal/FCC-geopolímero a partir de TDR.....	153
Figura 69 FCC- Porcentaje de pérdida de masa en el intervalo 35 - 600 °C.....	156
Figura 70 DTG para la pasta control cal/CCA a los 28 días de curado.....	158
Figura 71 DTG para las pastas cal/CCA-geopolímero comercial.....	160
Figura 72 DTG para las pastas cal/CCA-geopolímero a partir de la CCA.....	161

---

Figura 73 DTG para las pastas cal/CCA-geopolímero a partir de la TDN .....	162
Figura 74 DTG para las pastas cal/CCA-geopolímero a partir de la TDR .....	163
Figura 75 CCA-Porcentaje de pérdida de masa en el intervalo 35 - 600 °C.....	166
Figura 76 DTG para la pasta control cal/CLD .....	167
Figura 77 DTG para las pastas cal/CLD-geopolímero comercial .....	169
Figura 78 DTG para las pastas cal/CLD-geopolímero a partir de CCA. ....	170
Figura 79 CLD-Porcentaje de pérdida de masa en el intervalo 35 - 600 °C .....	172
Figura 80 Micrografías de las pastas FCC 00 y FCC 30GCOM a los 28 días de curado .....	174
Figura 81 Micrografías de las pastas FCC 30GRES, FCC 30GTDN y FCC 30GTDR a los 28 días de curado .....	176
Figura 82 Micrografías de las pastas CCA 00 y CCA 30GCOM a los 28 días de curado .....	178
Figura 83 Micrografías de las pastas CCA 30GRES, CCA 30GTDN y CCA 30GTDR a los 28 días de curado .....	179
Figura 84 SEM para CLD 00, CLD 30GCOM y CLD 30GRES .....	181
Figura 85 Diámetro de escurrimiento de las tres puzolanas control....	187
Figura 86 Rc de los morteros cal/FCC geopolímero comercial .....	190
Figura 87 Rc de los morteros cal/FCC geopolímero a partir de CCA.	193
Figura 88 Rc de los morteros cal/FCC geopolímero a partir de TDN.	195
Figura 89 Rc de los morteros cal/FCC geopolímero a partir de TDR.	197
Figura 90 Rc de los morteros cal/FCC y distintos geopolímeros .....	199

## ANEXOS I

---

Figura 91 Rc de los morteros cal/CCA geopolímero comercial.....	202
Figura 92 Rc de los morteros cal/CCA geopolímero a partir de CCA	204
Figura 93 Rc de los morteros cal/CCA geopolímero a partir de TDN	206
Figura 94 Rc de los morteros cal/CCA geopolímero a partir de TDR	208
Figura 95 Rc de los morteros cal/CCA y distintos geopolímeros .....	210
Figura 96 Rc de los morteros cal/CLD geopolímero comercial .....	212
Figura 97 Rc de los morteros cal/CLD geopolímero a partir de CCA	213
Figura 98 Rc de los morteros cal/CLD geopolímero comercial y residual .....	214
Figura 99 Rc de los morteros control y con 30 % de geopolímero comercial .....	215
Figura 100 Rc de los morteros control y con 30 % de geopolímero a partir de CCA .....	216
Figura 101 Rc de los morteros control y geopolímeros a partir de TD217	
Figura 102 CAA para los morteros cal/FCC-geopolímeros .....	223
Figura 103 CAA para los morteros cal/CCA-geopolímeros .....	224
Figura 104 CAA para los morteros cal/CLD-geopolímeros.....	225
Figura 105 Estado inicial y final de las probetas cal/FCC y geopolímeros I.....	233
Figura 106 Estado inicial y final de las probetas cal/FCC y geopolímeros II .....	234
Figura 107 Estado inicial y final de las probetas cal/CCA y geopolímeros I.....	235
Figura 108 Estado inicial y final de las probetas cal/CCA y geopolímeros II .....	236
Figura 109 Estado inicial y final de las probetas cal/CLD y geopolímeros .....	237

Figura 110 Fases constructivas de la bóveda [152].....	243
Figura 111 Montaje para la prueba a compresión y resultados del ensayo [151] .....	244
Figura 112 Probeta con rasillas geopoliméricas .....	245
Figura 113 Fase 1 de la propuesta de vivienda unifamiliar .....	286
Figura 114 Fase 2 de la propuesta de vivienda unifamiliar .....	286
Figura 115 Posibles alternativas de construcción en varias fases .....	287
Figura 116 Estudio solar y perspectivas exteriores .....	288
Figura 117 Perspectiva interior de los ambientes propuestos.....	288
Figura 118 Planta Baja de la vivienda unifamiliar .....	289
Figura 119 Planta Primer Piso de la vivienda unifamiliar.....	290
Figura 120 Tipologías de vivienda construidas por AEVIVIENDA...	291

### ANEXO II Índice de tablas

Tabla 1 Composición química en porcentaje en peso de óxidos del FCC .....	129
Tabla 2 Composición química en porcentaje en peso de óxidos de la CCA. .....	132
Tabla 3 Composición química en porcentaje en peso de óxidos de la CLD. .....	135
Tabla 4 Composición química en porcentaje en peso de óxidos de TDN .....	138
Tabla 5 Composición química en porcentaje en peso de óxidos de TDR .....	141
Tabla 6 Pérdidas de masa en % de las pastas FCC 00 a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	154
Tabla 7 Pérdidas de masa en % de las pastas FCC 30GCOM a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	154
Tabla 8 Pérdidas de masa en % de las pastas FCC 30GRES a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	154
Tabla 9 Pérdidas de masa en % de las pastas FCC 30GTDN a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	155
Tabla 10 Pérdidas de masa en % de las pastas FCC 30GTDR a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	155
Tabla 11 Pérdidas de masa en % de las pastas CCA 00 a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	164

---

Tabla 12 Pérdidas de masa en % de las pastas CCA 30GCOM a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	164
Tabla 13 Pérdidas de masa en % de las pastas CCA 30GRES a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	164
Tabla 14 Pérdidas de masa en % de las pastas CCA 30GTDN a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	165
Tabla 15 Pérdidas de masa en % de las pastas CCA 30GTDR a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	165
Tabla 16 Pérdidas de masa en % de las pastas CLD 00 a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	171
Tabla 17 Pérdidas de masa en % de las pastas CLD 30GCOM a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	171
Tabla 18 Pérdidas de masa en % de las pastas CLD 30GRES a los 3, 7, 28, 90 y 180 días de curado .....	171
Tabla 19 Índice de escurrimiento para los diferentes morteros mixtos. ....	185
Tabla 20 Dosificación en gramos para los morteros mixtos cal/FCC-geopolímero comercial .....	188
Tabla 21 Dosificación en gramos para los morteros mixtos cal/FCC-geopolímero a partir de CCA .....	192
Tabla 22 Dosificación en gramos para los morteros mixtos cal/FCC-geopolímero a partir de TDN .....	194
Tabla 23 Dosificación en gramos para los morteros mixtos cal/FCC-geopolímero a partir de TDR.....	196
Tabla 24 Dosificación para los morteros cal/CCA-geopolímero comercial .....	200

## ANEXOS II

---

Tabla 25 Dosificación para los morteros cal/CCA-geopolímero a partir de CCA .....	203
Tabla 26 Dosificación para los morteros cal/CCA-geopolímero a partir de TDN .....	205
Tabla 27 Dosificación para los morteros cal/CCA-geopolímero a partir de TDR .....	207
Tabla 28 Dosificación para los morteros cal/CLD-geopolímero comercial .....	211
Tabla 29 Dosificación para los morteros cal/CLD-geopolímero residual .....	212
Tabla 30 Resistencia a la compresión de los morteros de albañilería según EN 998-2 .....	219
Tabla 31 Resistencia a la compresión y % de variación de la resistencia de los morteros mixtos.....	230
Tabla 32 Resistencia a la flexotracción y % de variación de la resistencia de los morteros mixtos.....	231
Tabla 33 Resistencia a la compresión de los constituyente de las 4 probetas.....	245
Tabla 34 Comparación de la Rc para los 2 tipos de rasillas .....	246

### **ANEXO III Proyecto de Vivienda de bajo coste**

Al ser un proyecto de bajo coste se propone la auto-construcción por fases, las mismas se adaptarán según vaya cambiando las necesidades en la cantidad de espacios habitables y principalmente de la situación económica de los propietarios. La propuesta está pensada para un predio de 200 o 300 m<sup>2</sup>, superficies muy comunes en Bolivia.

La fase 1 corresponde al módulo principal cuyos ambientes son: un baño, un salón multifuncional, un dormitorio y la estructura para la ampliación de las fases restantes (ver Figura 113). Esta fase podría financiarse por las ayudas de la agencia estatal de vivienda.

La Fase 2 corresponde a la construcción de 2 habitaciones y 1 baño en el primer piso tal como se observa en la Figura 114, siendo esta ampliación a cargo del propietario de la vivienda.

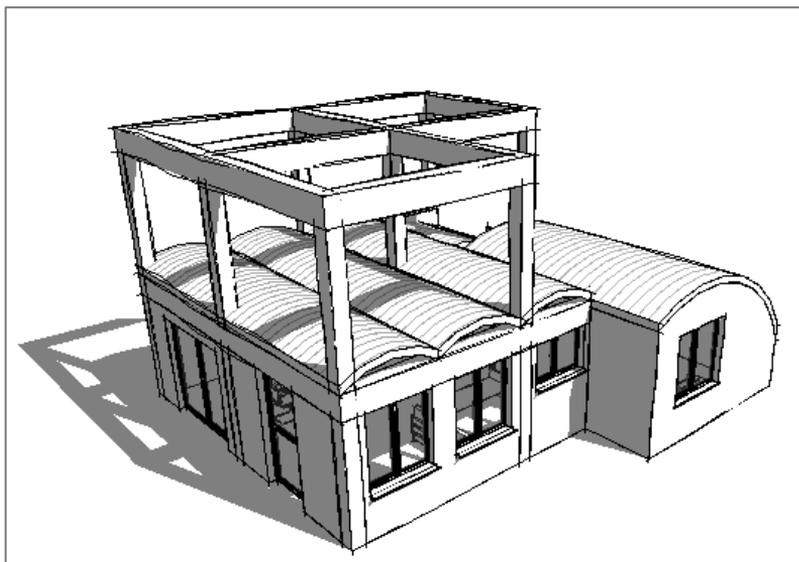


Figura 113 Fase 1 de la propuesta de vivienda unifamiliar

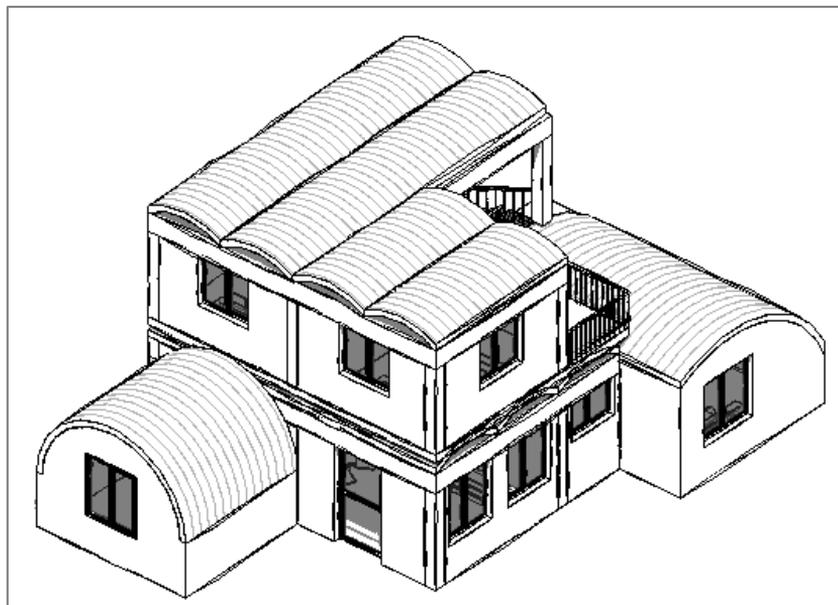


Figura 114 Fase 2 de la propuesta de vivienda unifamiliar

Sin embargo, para la construcción final de la vivienda pueden existir más de 2 fases, ya que cada uno de los ambientes de ampliación está pensado

que se pueda construir de forma independientemente a partir de la estructura base, pero al mismo tiempo cada una de estas ampliaciones aportan a la unidad de la vivienda sin que esta pueda afectar a su estética visual (ver Figura 115)

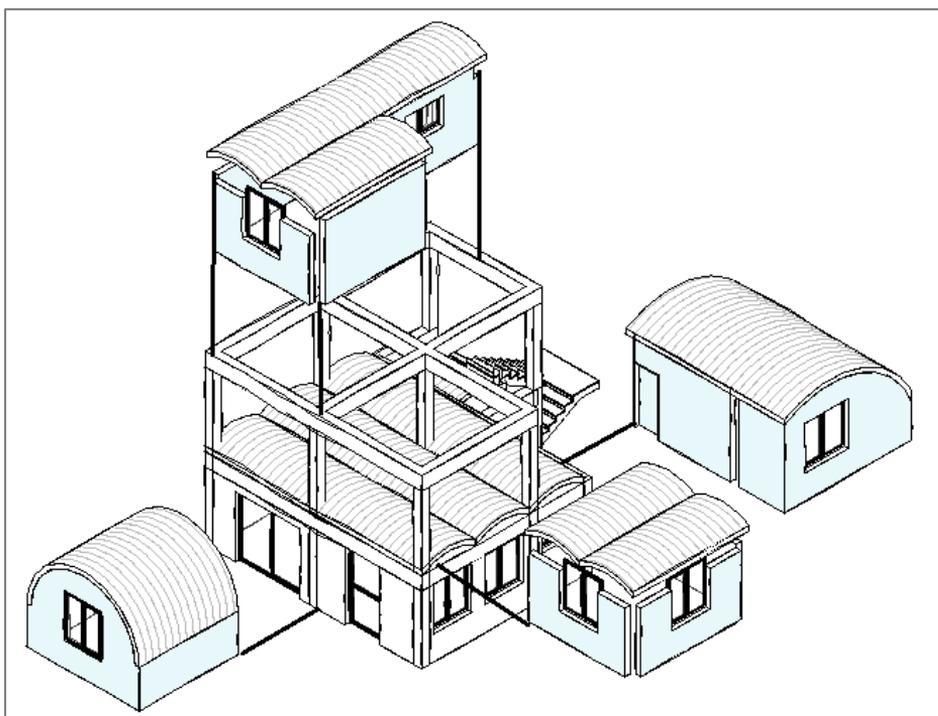


Figura 115 Posibles alternativas de construcción en varias fases

Siendo que actualmente los softwares de arquitectura e ingeniería nos permiten conocer de antemano cómo se va a comportar el edificio antes de construirlo en la realidad en la Figura 116 podemos observar un ejemplo del estudio solar de la vivienda propuesta, junto a algunas perspectivas exteriores de la misma. En la Figura 117 podemos observar las perspectivas interiores del salón múltiple y el dormitorio principal.



Figura 116 Estudio solar y perspectivas exteriores



Figura 117 Perspectiva interior de los ambientes propuestos

En las Figuras 118-119 podemos observar las plantas arquitectónicas de la propuesta de vivienda de 100 m<sup>2</sup>.

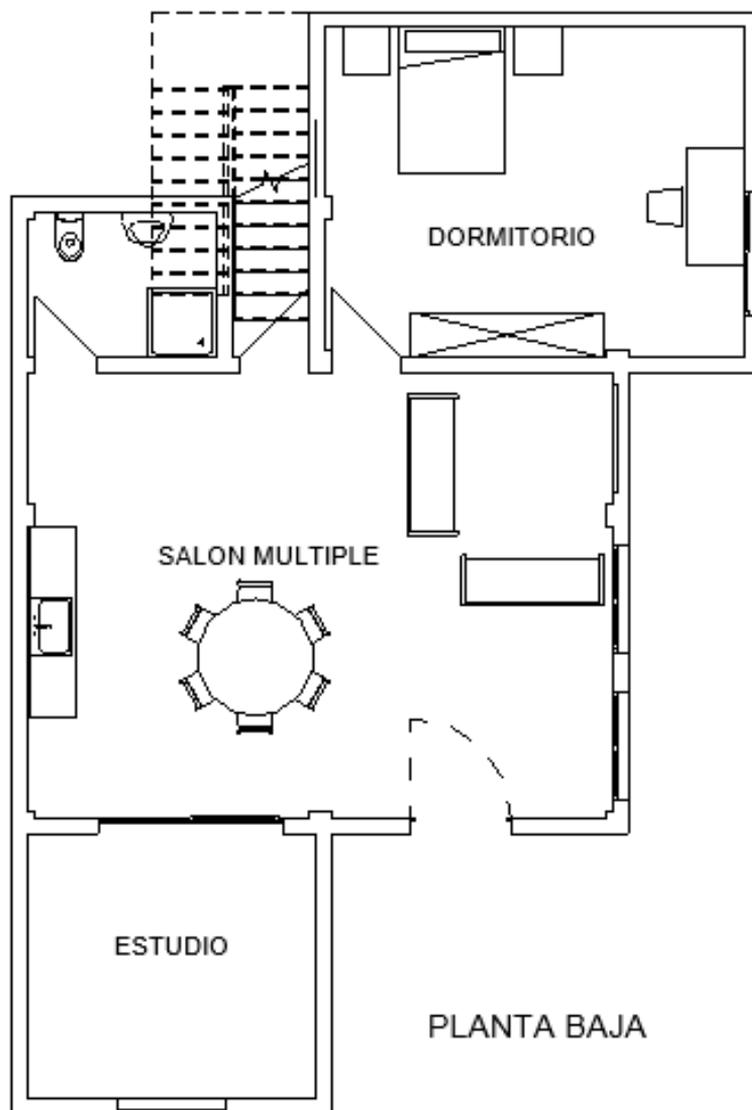


Figura 118 Planta Baja de la vivienda unifamiliar

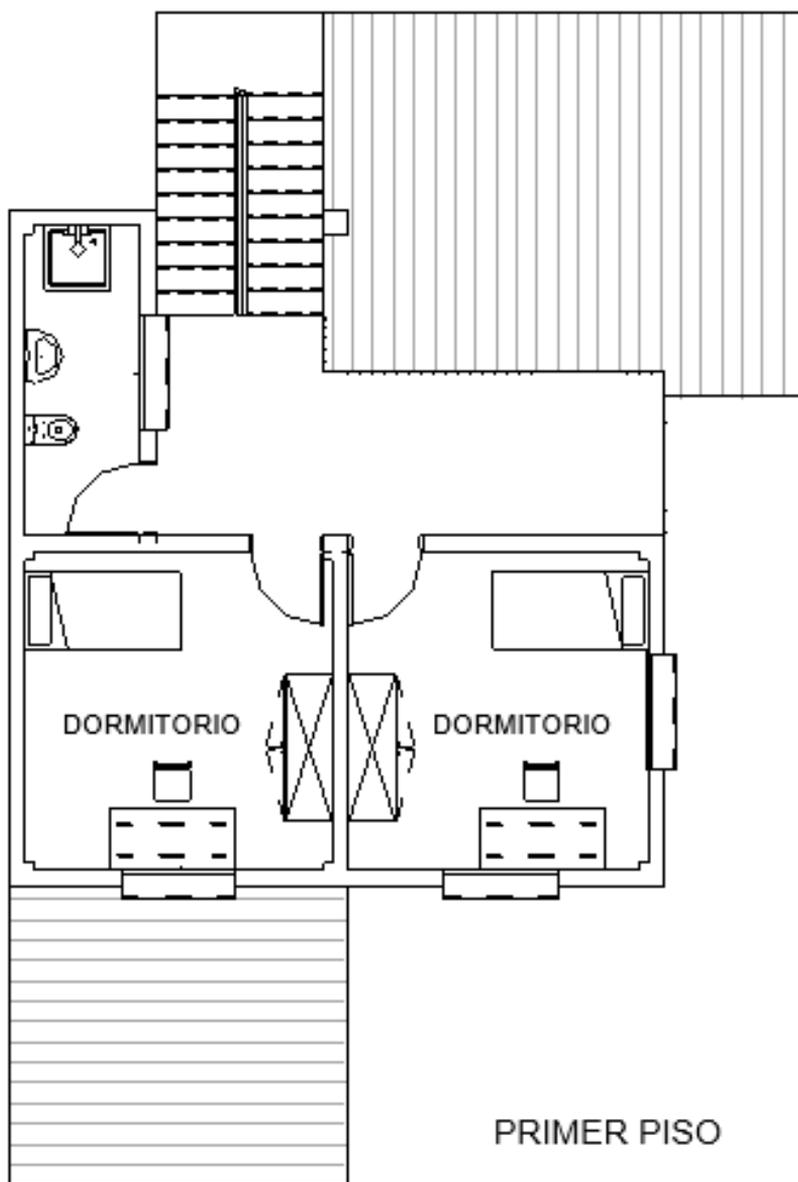


Figura 119 Planta Primer Piso de la vivienda unifamiliar

Finalmente, en la Figura 120 observamos algunas tipologías de vivienda que actualmente está construyendo la Agencia Estatal de Vivienda (AEVIVIENDA) en Bolivia



Figura 120 Tipologías de vivienda construidas por AEVIVIENDA