



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería de la Construcción y
Proyectos de Ingeniería Civil

Tesis Doctoral

*Utilización de residuos de neumáticos fuera de uso en
conglomerantes con base cemento portland y de activación
alcalina para uso en prefabricados de bajo coste económico y
medioambiental.*

Autor: Edwin Roberto Gudiel Rodríguez

Dirigida por:

Dr. José Monzó Balbuena
Dr. Jordi Payá Bernabeu

Valencia, Octubre de 2017

Dedicatoria

A mi esposa y mi hijo Qhaly.

A mi Familia.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al Pronabec – Perú por otorgarme una beca, poder realizar los estudios de doctorado y cumplir así con una meta más en mi vida profesional

A mis dos tutores, al doctor José María Monzó Balbuena, por su guía diaria, el tiempo que me brindo con sus consejos, no solo académicos sino personales, al doctor Jordi Paya Bernabeu, por su asesoramiento y paciencia en cada una de las etapas de estudio.

A mi esposa Eva por todo el apoyo, ánimos y días de alegría.

A los miembros de este gran grupo GIQUIMA por el apoyo brindado en estos años de trabajo y aprendizaje, A Lourdes, Viki, Noelia, Pablo, Juan, Nabil.

A todos los amigos y amigas que me acompañaron y compartimos lindos momentos.

Resumen

En muchos países del mundo y más aún en países en desarrollo está muy presente el problema generado por la presencia de los neumáticos fuera de uso (NFU), fundamentalmente porque carecen de una recogida selectiva y de un adecuado sistema de gestión.

El método del recauchutado es el proceso alternativo en la gestión de NFU el cual consiste en sustituir la banda de rodadura gastada de un neumático usado, realizando la reconstrucción de su estructura original. El raspado de la superficie, es la etapa donde se genera la totalidad de los residuos que se obtienen en forma de fibras de neumático (FN) y partículas. Este tipo de residuos puede ser valorizado como materia prima para obtener elementos de construcción prefabricados no convencionales y de bajo coste económico y medio ambiental.

En este trabajo se han usado residuos de neumáticos en la preparación de matrices de cemento/puzolana y matrices de activación alcalina. Para ello se han utilizado distintos residuos: En el caso de matrices cementicias se han utilizado como puzolana un residuo de la industria del petróleo; el catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como una sustitución del 15% de cemento por este residuo.

En el caso de los morteros geopoliméricos se ha usado como agente precursor dos tipos de residuos: el FCC, y la escoria de alto horno (SC). Por otra parte, y para la preparación de la disolución activadora se ha usado una mezcla de hidróxido sódico con ceniza de cáscara de arroz (CCA), como fuente de sílice. Paralelamente, y para los morteros con escoria, se ha usado como activador carbonato sódico.

En todos los sistemas anteriores, se han sustituido parte o todo el árido por FN, como una opción ecológica para la reutilización de este material.

El objetivo de este estudio es la valorización del NFU a partir de su aplicación como FN en mezclas conglomerantes ultraligeras con base de cemento portland y cemento activado alcalinamente, por lo que se han analizado muchas de sus propiedades, físicas, mecánicas, térmicas y termográfica, para desarrollar aplicaciones en la ingeniería civil y la edificación como es el caso de las tejas de microconcreto.

El uso de FN disminuye la densidad de las mezclas endurecidas y alcanza los valores mínimos de resistencia a compresión, recogidos por la norma para piezas de mampostería. Por otra parte, el análisis de termografía y de conductividad térmica manifiestan que el incremento de FN en la dosificación de los morteros disminuye los valores de calor transmitido en el material estudiado, alcanzando valores menores que en hormigones convencionales y similares al del hormigón ligero con arcilla expandida.

Resum

A molts països del món, i especialment en països en desenvolupament, està molt present el problema produït per la presència dels pneumàtics fora d'ús (NFU), principalment perquè els manca una recollida selectiva i amb un adequat sistema de gestió.

El mètode del recautxutat és el procés alternatiu en la gestió de NFU, el qual consisteix en substituir la banda de rodament gastada d'un pneumàtic utilitzat, realitzant la reconstrucció de la seua estructura original. El raspat de la superfície és l'etapa on es genera la totalitat dels residus que s'obtenen en forma de fibres de pneumàtic (FN) i partícules. Aquest tipus de residus pot ser valoritzat com a matèria prima per a obtenir elements prefabricats no convencionals i de baix cost econòmic i mediambiental.

En aquest treball s'han utilitzat residus de pneumàtics en la preparació de matrius de ciment/putzolana i matrius d'activació alcalina. Amb eixe objectiu, s'han utilitzat diversos residus: En el cas de matrius cementícies s'ha utilitzat com a putzolana un residu de la indústria del petroli; el catalitzador gastat de craqueig catalític (FCC) com una substitució del 15% de ciment per aquest residu.

En el cas dels morters geopolimèrics, s'han utilitzat com agent precursor dos tipus de residus: el FCC i l'escòria d'alts forns (SC). D'altra banda, per a la preparació de la dissolució activadora s'ha utilitzat una mescla d'hidròxid sòdic amb cendra de la corfa d'arrós (CCA) com a font de sílice.

En tots els sistemes mencionats, s'ha substituït parcial o totalment l'àrid per FN, com una opció ecològica per a la reutilització d'aquest material.

L'objectiu d'aquest estudi és la valorització del NFU a partir de la seua aplicació com FN en mescles conglomerants ultralleugeres amb base de ciment pòrtland i ciment activat alcalinament. Per aquest motiu, s'han analitzat moltes de les seues propietats, físiques, mecàniques, tèrmiques i termogràfiques, per a desenvolupar aplicacions en l'enginyeria civil i l'edificació, com ara les teules de microformigó.

L'ús de FN disminueix la densitat de les mescles endurides i aconseguix els valors mínims de resistència a compressió, recollits per la norma per a peces de maçoneria. D'altra banda, l'anàlisi de termografia i de conductivitat tèrmica manifesten que l'augment de FN en la dosificació dels morters disminueix els valors de calor transmès en el material estudiat, obtenint valors menors comparat amb els formigons convencionals i similars al formigó lleuger amb argila expandida.

Abstract

In many countries around the world, and even more so in developing countries, the problem of the use of end-of-life tires (NFU) is very much present, mainly because they lack selective collection and an adequate management system.

The retreading method is the alternative process in NFU management, which consists of replacing the worn tread of a used tire, performing the reconstruction of its original structure. The scraping of the surface is the stage where all the waste that is obtained in the form of tire fibers (FN) and particles is generated. This type of waste can be valued as raw material to obtain pre-fabricated non-conventional building elements and low economic and environmental costs.

In this work, tire residues have been used in the preparation of cement / pozzolan matrices and alkaline activation matrices. For this purpose different residues have been used: In the case of

cementitious matrices, a residue of the petroleum industry has been used as pozzolan; The fluid catalytic cracking (FCC) as a 15% substitution of cement for this residue.

In the case of geopolymeric mortars, two types of waste have been used as the precursor agent: FCC, and blast furnace slag (SC). On the other hand, and for the preparation of the activator solution, a mixture of sodium hydroxide and rice husk ash (CCA) has been used as the source of silica. In parallel, and for mortars with slag, sodium carbonate activator has been used as activator.

In all previous systems, part or all of the aggregate has been replaced by FN, as an ecological option for the reuse of this material.

The objective of this study is to evaluate the NFU from its application as FN in ultra-light binder mixtures based on portland cement and alkaline activated cement, so that many of its physical, mechanical, thermal and thermographic properties have been analyzed, To develop applications in civil engineering and building as is the case of microconcrete tiles.

The use of FN decreases the density of the hardened mixtures and reaches the minimum values of compressive strength, collected by the standard for masonry pieces. On the other hand, the analysis of thermography and thermal conductivity show that the increase of FN in the dosage of mortars decreases the values of heat transmitted in the studied material, reaching lower values than in conventional concretes and similar to that of light concrete with clay expanded.

Glosario de términos

NFU	Neumáticos fuera de uso
FCC	Catalizador de Craqueo Catalítico del Petróleo
CCA	Ceniza de cáscara de arroz
SC	Escoria de alto horno
FN	Fibra de neumático
FC	Fibra de camión
FT	Fibra de turismo
CP	Cemento Portland
CAA	Cemento activado alcalinamente
SIL	Árido silíceo
CAL	Árido calizo

Índice de contenidos

Dedicatoria	VII
Agradecimientos.....	IX
Resumen	XI
Resum	XIII
Abstract	XV
Glosario de términos	XVII
Índice de contenidos.....	XIX
Índice de figuras	XXVII
Índice de tablas	XXXIX
1) Introducción	1
1.1 Hipótesis.....	4
1.2 Estructura de la tesis.....	4
2) Estado del arte	7
2.1 Contexto medioambiental.....	7
2.2 La industria del neumático	8
2.2.1 Generación y gestión del neumático fuera de uso	11
2.2.2 El recauchutado	14
2.2.2.1 Proceso de recauchutado.....	15
2.2.2.2 El raspado en el recauchutado	16
2.2.3 Alternativas a la gestión de neumáticos	16
2.3 Matrices cementicias fibroreforzadas.....	20
2.4 Conglomerantes con residuos de NFU	21
2.4.1 Trabajabilidad	21
2.4.2 Densidad.....	22

2.4.3	Propiedades mecánicas.	22
2.4.4	Comportamiento acústico.	24
2.4.5	Comportamiento térmico.	24
2.5	La industria del cemento y la activación alcalina.	25
2.5.1	Matrices de CAA fibroreforzadas.	28
2.5.2	Conglomerantes en base CAA con residuos de NFU	28
2.6	Valorización de residuos industriales en la construcción	29
2.6.1	Elementos prefabricados: ladrillos, bloques, placas y tejas de microconcreto.	30
2.6.1.1	Tejas de microconcreto. (TMC)	32
3)	Objetivos.	35
3.1	Objetivo General.	35
3.2	Objetivos específicos.	35
4)	Metodología Experimental.	37
4.1	Materiales.	37
4.1.1	Fibra de neumático (FN).	37
4.1.2	Cemento Portland (CP).	39
4.1.3	Áridos.	39
4.1.3.1	Árido silíceo.	40
4.1.3.2	Árido calizo.	40
4.1.4	Agua.	40
4.1.5	Catalizador de Craqueo Catalítico del Petróleo (FCC)	40
4.1.6	Ceniza de cáscara de arroz (CCA).	42
4.1.7	Escoria de alto horno (SC).	43
4.1.8	Carbonato de sodio (Na ₂ CO ₃).	45
4.1.9	Hidróxido de sodio (NaOH).	45
4.1.10	Otros reactivos Químicos.	45

4.2	Equipos y procedimientos experimentales	46
4.2.1	Toma de muestra insitu.	46
4.2.2	Granulometría	46
4.2.2.1	Granulometría de las fibras de neumático	48
4.2.2.2	Granulometría de los áridos	50
4.2.3	Determinación de la densidad	51
4.2.3.1	Densidad de los áridos.	51
4.2.3.2	Densidad de la fibra de neumático	53
4.2.4	Molienda.	55
4.2.4.1	Molino de bolas.....	56
4.2.5	Peso específico – densidad.....	56
4.2.6	Preparación de la disolución activadora	59
4.2.6.1	Activador usado con FCC.....	59
4.2.6.2	Activador usado con el precursor escoria de alto horno (SC)	61
4.2.7	Dosificación	61
4.2.7.1	Probetas prismáticas	62
4.2.7.1.1	Morteros de cemento portland para probetas de 4x4x16 cm ³	62
4.2.7.1.2	Morteros de activación alcalina usando como precursor FCC para probetas de 4x4x16 cm ³	64
4.2.7.1.3	Morteros de activación alcalina usando como precursor SC para probetas de 4x4x16 cm ³	66
4.2.7.2	Placas	67
4.2.7.2.1	Morteros de cemento portland - placa	68
4.2.7.2.2	Morteros de activación alcalina usando como precursor FCC – placa.....	70

4.2.7.2.3 Morteros de activación alcalina usando como precursor SC - placa	71
4.2.7.3 Tejas de microconcreto	73
4.2.7.3.1 Morteros de cemento portland – teja	73
4.2.7.3.2 Morteros de activación alcalina usando como precursor FCC –Teja	75
4.2.7.3.3 Morteros de activación alcalina usando como precursor SC - teja.....	77
4.2.8 Fabricación de probetas prismáticas (4x4x16 cm ³) con morteros de CP y cemento activado alcalinamente.	80
4.2.8.1 Equipos usados en la fabricación de los morteros. ...	81
4.2.8.1.1 Procedimientos de amasado morteros CP.	82
4.2.8.1.2 Procedimiento de amasado de morteros de FCC y morteros con SC.....	82
4.2.8.2 Equipos usados en la fabricación de probetas prismáticas (4x4x16 cm ³).	83
4.2.8.2.1 Procedimientos de fabricación de probetas prismáticas de CP.....	85
4.2.8.2.2 Procedimientos de fabricación de probetas prismáticas de FCC y probetas de SC.....	85
4.2.8.3 Curado	86
4.2.8.3.1 Baño térmico.....	86
4.2.8.3.2 Cámara húmeda.....	87
4.2.9 Fabricación de tejas con morteros de CP y cemento activado alcalinamente.	88
4.2.9.1 Equipos usados en la fabricación de tejas.	88
4.2.9.1.1 Procedimientos de fabricación de tejas de CP y cemento activado alcalinamente.	89

4.2.10	Fabricación de placas con morteros de CP y cemento activado alcalinamente.	91
4.2.10.1	Equipos usados en la fabricación de placas.....	91
4.2.10.1.1	Procedimientos de fabricación de placas de CP y cemento activado alcalinamente.	92
4.2.11	Determinación de la trabajabilidad.	93
4.2.12	Caracterización mecánica	94
4.2.12.1	Probetas prismáticas de 4 x 4 x 16 cm ³	94
4.2.12.2	Tejas	95
4.2.13	Densidad aparente en seco y absorción de agua	96
4.2.14	Velocidad de ultrasonido	97
4.2.15	Conductividad térmica	98
4.2.16	Caracterización Microestructural (FESEM).	99
4.2.17	Ensayos de Termografía	101
4.2.18	Tejas. Ensayos de impermeabilidad al agua	105
4.2.19	Tejas. Ensayos de resistencia al impacto.....	107
5)	Resultados y discusión.....	109
5.1	Trabajabilidad – caracterización en estado fresco ..	110
5.1.1	Morteros de cemento portland - CP.....	110
5.1.2	Morteros de escoria de alto horno - SC.....	112
	Conclusiones de trabajabilidad – caracterización en estado fresco.	114
5.2	Densidad aparente en seco y absorción en porcentaje	115
5.2.1	Dap y Abs de morteros de CP	115
5.2.2	Dap y Abs de morteros de activación FCC - CCA... ..	119
5.2.3	Dap y Abs de morteros de SC	122
	Conclusiones de densidad aparente en seco y absorción en porcentaje.....	131

5.3	Resistencia mecánica	132
5.3.1	Resistencia mecánica de morteros de CP.....	132
5.3.2	Resistencia mecánica de morteros de FCC - CCA .	141
5.3.3	Resistencia mecánica de morteros de SC.....	151
5.3.4	Comparación de las resistencias mecánicas de los morteros.....	159
	Conclusiones Resistencias mecánicas.....	169
5.4	Estudios microestructurales mediante microscopía electrónica - FESEM.....	170
5.4.1	Microestructura de morteros de CP	170
5.4.2	Microestructura de morteros de activación alcalina (FCC – SC).....	173
5.4.2.1	Microestructura de morteros de activación alcalina usando como precursor FCC.....	174
5.4.2.2	Microestructura de morteros de activación alcalina usando como precursor SC.....	175
	Conclusiones Microestructura SEM -FESEM	177
5.5	Velocidad de ultrasonido	177
	Conclusiones de los ensayos de velocidad de ultrasonido ...	182
5.5.1	Conductividad térmica	183
	Conclusiones de los ensayos de conductividad térmica.	189
5.6	Termografía.....	189
	Conclusiones de los ensayos de termografía.....	192
5.7	Tejas – Esfuerzo de flexión.	192
5.7.1	Tejas de mortero de CP. Esfuerzo de flexión.	193
5.7.2	Tejas de mortero de CAA con precursor de FCC. Esfuerzo de flexión.	196
5.7.3	Tejas de mortero de CAA con precursor de SC. Esfuerzo de flexión.	197
5.7.4	Comparación del esfuerzo de flexión de las tejas. ..	198

5.8	Tejas. Ensayo de peso y espesor.	200
5.8.1	Pesos.....	200
5.8.2	Espesor.....	204
5.9	Tejas. Resistencia al impacto.....	205
5.10	Tejas. Ensayos de permeabilidad	212
5.11	Análisis económico y medioambiental	213
	Conclusiones de los ensayos en tejas.....	217
6)	Conclusiones.....	219
6.1	Conclusión general.....	223
7)	Líneas futuras de investigación .	225
8)	Referencias	227

Índice de figuras

Figura 2.1 Modelos para la administración de la gestión de los neumáticos fuera de uso en el Europa, que muestra las mayores organizaciones de recuperación / reciclaje que operan en países de la UE (ETRMA, 2010a) [5]	11
Figura 2.2 Incendio en Cementerio de neumáticos de Seseña - Madrid - 05 – 2016 [40].....	12
Figura 2.3 Etapas en el proceso del recauchutado. [7]	15
Figura 2.4 Estructura del neumático.[51].....	16
Figura 2.5 Sandalias artesanales hechas con NFU. [52], [53] 17	
Figura 2.6 Mobiliario dentro de casa [54]	18
Figura 2.7 Mobiliario dentro de casa - mobiliario urbano [54]..	18
Figura 2.8 Mobiliario urbano [54]	18
Figura 2.9 Muro de contención hechos con NFU [54]	19
Figura 2.10 Planta de la vivienda diseñada por Michael Reynolds [55]–[59].....	19
Figura 2.11 Vivienda en Nuevo México construida con NFU – Michael Reynolds [55]–[59]	19
Figura 4.1 Material cedido por la empresa MCE.	38
Figura 4.2 Curva de distribución granulométrica del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC).....	41
Figura 4.3 Curva de distribución granulométrica de la ceniza de cascara de arroz (CCA).....	43
Figura 4.4 Curva de distribución granulométrica de la escoria de alto horno (SC)	44

Figura 4.5 Tamizador electromagnético	47
Figura 4.6 Equipo para granulometría láser.	48
Figura 4.7 Fibra de neumático usada en la fabricación de los morteros. (a) Fibra de turismo FT (25 mm) - (b) fibra de camión FC (30mm).....	48
Figura 4.8 Granulometría de las fibras de neumático.....	49
Figura 4.9 Granulometría de árido silíceo (grueso, medio ,fino) - Mezcla	50
Figura 4.10 Granulometría de los áridos silíceo, calizo y referencia CEN	51
Figura 4.11 Elementos usados en el ensayo.....	52
Figura 4.12 probeta graduada para ensayo de densidad.....	54
Figura 4.13 Estufa	55
Figura 4.14 Molino de bolas modelo Speedy 1 – Empresa Nannetti	56
Figura 4.15 Volumenómetro de Le Chatelier.....	57
Figura 4.16 Recipiente termostatzado de uso doméstico.....	60
Figura 4.17 Amasadora normalizada.....	81
Figura 4.18 Molde de acero para las probetas prismáticas - EN 196-1.....	83
Figura 4.19 Mesa de sacudidas EN 196-1	84
Figura 4.20 Mesa vibratoria	84
Figura 4.21 Baño térmico.	87
Figura 4.22 Cámara húmeda.....	87
Figura 4.23 Mesa vibradora - Tejas.....	88
Figura 4.24 Molde para tejas	89
Figura 4.25 Elaboración de teja.....	90

Figura 4.26 Curado de tejas encamara húmeda	91
Figura 4.27 Molde de silicona para placas.	91
Figura 4.28 Placas de 15 x 15 x 2 cm ³	92
Figura 4.29 Mesa de sacudidas y molde de latón EN 1015-3 - Mortero antes de las sacudidas.....	94
Figura 4.30 Equipo para la determinación de la resistencia a flexión por tres puntos (derecha) y compresión (izquierda) según EN 196-1.....	95
Figura 4.31 Piezas y ensayo de resistencia a flexión transversal	96
Figura 4.32 Estufa de secado.....	97
Figura 4.33 Equipo de medición de tiempo de transmisión de ultrasonidos	98
Figura 4.34 Equipo de medición de conductividad térmica (izquierda) - probeta en ensayo (derecha) según la norma UNE EN 10456:2012.....	99
Figura 4.35 Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM)	101
Figura 4.36 preparación de muestras para FESEM	101
Figura 4.37 Caja aislada térmicamente - cámara termográfica	102
Figura 4.38 Esquema del ensayo realizado	103
Figura 4.39 Imágenes infrarrojas tomadas cada 5 minutos...	104
Figura 4.40 Software usado para el análisis de las imágenes infrarrojas.....	104
Figura 4.41 (a) imagen térmica infrarroja / (b) sección P1. ..	105
Figura 4.42 Curvas de temperatura - cada 5 minutos	105

Figura 4.43 Ensayo de impermeabilidad al agua en tejas de microconcreto	106
Figura 4.44 Equipo usado en ensayo de impacto – teja rota después del ensayo de impacto	108
Figura 5.1 Valores de escurrimiento (E) de morteros elaborados con CP	110
Figura 5.2 Valores de escurrimiento (E) de morteros de CP vs CP -15% FCC	111
Figura 5.3 Valores de escurrimiento (E) de morteros elaborados con SC	112
Figura 5.4 Valores de Escurrimiento CP vs SC	113
Figura 5.5 Absorción de los morteros con árido – CP y CP 15%FCC – ver codigos en Tabla 4.18 y Tabla 4.20).....	118
Figura 5.6 Absorción de los morteros con relación CP/FC sin árido, solo conteniendo FC y CP – CP 15%FCC	119
Figura 5.7 Absorción de agua - morteros de FCC con árido y FC	121
Figura 5.8 Absorción de los morteros sin árido con matrices FCC - CCA	121
Figura 5.9 Absorción de los morteros con árido – SC	123
Figura 5.10 Absorción de los morteros sin árido con matriz -SC	124
Figura 5.11 Dap de los morteros con árido silíceo con matrices cementicias de CP y CP15%FCC y de cemento activado alcalinamente con matrices de FCC y SC	125
Figura 5.12 Dap de los morteros con árido calizo con matrices cementicias de CP y CP15%FCC y de cemento activado alcalinamente con matrices de FCC y SC	125
Figura 5.13 Coeficiente de absorción de los morteros con árido silíceo con matrices cementicias de CP y CP15%FCC y de cemento activado alcalinamente con matrices de FCC y SC	126

Figura 5.14 Coeficiente de absorción de los morteros con árido calizo con matrices cementicias de CP y CP15%FCC y de cemento activado alcalinamente con matrices de FCC y SC127	
Figura 5.15 . Imágenes tomadas con microscopio óptico (a) (b) C-SC25 (c) (d) C-CC25.	128
Figura 5.16 Imágenes tomadas con microscopio óptico (a) (b) CF-SC25 (c) (d) CF-CC25.....	129
Figura 5.17 Imágenes tomadas con microscopio óptico (a) (b) FC-SC25 (c) (d) FC-CC25.....	130
Figura 5.18 Imágenes tomadas con microscopio óptico (a) (b) SC-SC25 (c) (d) SC-CC25.....	130
Figura 5.19 Rf morteros de CP con árido (SIL – CAL) y FC – FT . (Ver códigos en la Tabla 4.18).....	133
Figura 5.20 Rc morteros de CP con árido (SIL – CAL) y FC – FT (ver códigos en la Tabla 4.18).....	134
Figura 5.21 Rf morteros de CP sin árido. (ver Tabla 4.19)...	135
Figura 5.22 Rc morteros de CP sin árido (Ver códigos en Tabla 4.19).....	136
Figura 5.23 Rf morteros de CP - 15% FCC con árido (SIL-CAL) y FC FT (ver códigos en Tabla 4.20).....	137
Figura 5.24 Rc morteros de CP - 15% FCC con árido (SIL - CAL) y FC – FT (ver códigos en Tabla 4.20).....	138
Figura 5.25 Rf morteros de CP - 15% FCC sin árido (ver códigos en Tabla 4.21).....	139
Figura 5.26 Rc morteros de CP - 15% FCC sin árido (ver códigos en Tabla 4.21).....	139
Figura 5.27 Rf de morteros de CP vs CP - 15%FCC a edad de 28 días. (ver códigos en la Tabla 4.18, Tabla 4.19, Tabla 4.20 y Tabla 4.21).....	140

Figura 5.28 Rc de morteros de CP vs CP - 15%FCC a edad de 28 días. (ver códigos en la Tabla 4.18, Tabla 4.19, Tabla 4.20 y Tabla 4.21).....	141
Figura 5.29 Rf de morteros de FCC-CCA con árido silíceo y calizo y FC curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C.....	142
Figura 5.30 Rc de morteros de FCC-CCA con árido silíceo y calizo y FC curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C.....	143
Figura 5.31 Rf de morteros de FCC – CCA sin árido curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C. (Ver dosificación en la.....)	144
Figura 5.32 Rc de morteros de FCC – CCA sin árido curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C	145
Figura 5.33 Rf de morteros de FCC-CCA con árido silíceo y calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C	146
Figura 5.34 Rc de morteros de FCC-CCA con árido silíceo y calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C	147
Figura 5.35 Rf de morteros de FCC – CCA sin árido curados en baño térmico a una temperatura de 65°C. (Ver dosificación en la	148
Figura 5.36 Rc de morteros de FCC – CCA sin árido curados en baño térmico a una temperatura de 65°C. (Ver dosificación en la	148
Figura 5.37 Rf de morteros de FCC-CCA con árido silíceo - calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C vs curados a 20°C en cámara húmeda.....	149
Figura 5.38 Rc de morteros de FCC-CCA con árido silíceo - calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C vs curados a 20°C en cámara húmeda.....	150

Figura 5.39 Rf de morteros de SC con árido silíceo y calizo y FC curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C.....	152
Figura 5.40 Rc de morteros de SC con árido silíceo y calizo y FC curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C.....	153
Figura 5.41 Rf de morteros de SC sin árido curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C. (Ver dosificación en la Tabla 4.26).....	154
Figura 5.42 Rc de morteros de SC sin árido curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C. (Ver dosificación en la Tabla 4.26).....	154
Figura 5.43 Rf de morteros de SC con árido silíceo y calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C.....	155
Figura 5.44 Rc de morteros de SC con árido silíceo y calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C.....	156
Figura 5.45 Rf de morteros de SC sin árido curados en baño térmico a una temperatura de 65°C. (Ver dosificación en la Tabla 4.27).....	157
Figura 5.46 Rc de morteros de SC sin árido curados en baño térmico a una temperatura de 65°C. (Ver dosificación en la Tabla 4.27).....	157
Figura 5.47 Rf de morteros de SC con árido silíceo - calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C vs curados a 20°C en cámara húmeda.....	158
Figura 5.48 Rc de morteros de SC con árido silíceo - calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C vs curados a 20°C en cámara húmeda.....	159
Figura 5.49 Rf. morteros de CP, FCC y SC con árido silíceo a 28 días de edad curados en cámara húmeda a 20 °C	160
Figura 5.50 Rf. morteros de CP, FCC y SC con árido calizo a 28 días de edad curados en cámara húmeda a 20 °C	161

Figura 5.51 Rc. morteros de CP, FCC y SC con árido silíceo a 28 días de edad curados en cámara húmeda a 20 °C	162
Figura 5.52 Rc. morteros de CP, FCC y SC con árido calizo a 28 días de edad curados en cámara húmeda a 20 °C	162
Figura 5.53 comparación de la Rc de los áridos silíceo y calizo – mortero sin árido.....	163
Figura 5.54 Curvas tensión-deformación de morteros de CP y CP 15% FCC usando árido silíceo.(figuras a la izquierda morteros con FC, figuras a la derecha morteros con FT) (ver códigos en la Tabla 4.18, Tabla 4.19, Tabla 4.20, Tabla 4.21)	164
Figura 5.55 Curvas tensión-deformación de morteros de CP y CP 15% FCC usando árido calizo. (figuras a la izquierda morteros con FC, figuras a la derecha morteros con FT) (ver códigos en la Tabla 4.18, Tabla 4.19, Tabla 4.20, Tabla 4.21)	165
Figura 5.56 Curvas tensión-deformación de morteros de FCC usando árido silíceo (figura a la izquierda) y árido calizo (figuras a la derecha) con FC (ver códigos en la Tabla 4.22,.....	166
Figura 5.57 Curvas tensión-deformación de morteros de SC usando árido silíceo (figura a la izquierda) y árido calizo (figuras a la derecha) con FC (ver códigos en la Tabla 4.26, Tabla 4.27)	166
Figura 5.58 Flexibilidad al 60% de la carga máxima en función del % de FC.....	167
Figura 5.59 Rc frente a la Dap de los morteros con árido silíceo (a) y árido calizo (b).....	168
Figura 5.60 Micrografía de mortero con árido calizo, CP F15%FCC con un 25% de FC (100 μm).....	171
Figura 5.61 Micrografías de CP, mortero de CP con 25% de sustitución de árido silíceo por FC. (2 μm izquierda) – mortero de CP sin árido (20 μm derecha).....	172

Figura 5.62 Micrografías (10 μm) de mortero de CP con 25% de sustitución de árido silíceo por FC. Izquierda Imagen con SE, derecha Imagen con BSE.....	172
Figura 5.63 Micrografía de mortero con cemento y 100% FC173	
Figura 5.64 Micrografías de morteros de FCC con 25% de sustitución de árido calizo por FC (izquierda) y mortero de FCC sin árido (derecha).....	174
Figura 5.65 Micrografía del mortero geopolimérico FCC, con 15 % de sustitución de árido silíceo por FC	175
Figura 5.66 Micrografías de morteros de SC con 25 % de sustitución de árido calizo por FC (izquierda) y mortero de SC sin árido (derecha)	176
Figura 5.67 Micrografía de mortero con SC sin árido	176
Figura 5.68 Velocidad de ondas longitudinales de ultrasonido en morteros con árido silíceo.....	178
Figura 5.69 Velocidad de ondas longitudinales de ultrasonido en morteros con árido calizo.....	179
Figura 5.70 Velocidad de ondas longitudinales de ultrasonido en morteros sin árido	180
Figura 5.71 Velocidad de onda longitudinal promedio de los morteros de base CP y CAA.....	181
Figura 5.72 Correlación de la densidad aparente en seco frente a la velocidad de onda longitudinal.....	181
Figura 5.73 Resistencia a compresión frente a la velocidad de onda longitudinal.....	182
Figura 5.74 Valores de conductividad térmica de morteros con árido silíceo.....	185
Figura 5.75 Valores de conductividad térmica de morteros con árido calizo.....	186

Figura 5.76 Conductividad térmica de los morteros con base CP y CAA.....	187
Figura 5.77 Valores de conductividad térmica de morteros sin árido.....	188
Figura 5.78 Correlación de la conductividad térmica frente a densidad aparente en seco	188
Figura 5.79 Promedio de la temperatura final alcanzada en la superficie exterior de la placa, de los morteros de CP y CAA con árido silíceo a 160 °C.....	191
Figura 5.80 Promedio de la temperatura final alcanzada en la superficie exterior de la placa, de los morteros de CP y CAA con árido calizo a 160 °C.....	191
Figura 5.81 Resistencia a Flexión Transversal - Tejas - CP	193
Figura 5.82 Segmento de una teja con árido calizo, las líneas rojas muestran la dirección de las grietas poco profundas....	194
Figura 5.83 Resistencia a Flexión Transversal Tejas - CP 15% FCC	195
Figura 5.84 Rf tejas con CP vs CP - 15%FCC / 28D.....	196
Figura 5.85 Resistencia a Flexión Transversal Tejas - FCC	197
Figura 5.86 Resistencia a Flexión Transversal Tejas - SC..	198
Figura 5.87 Resistencia a Flexión Transversal tejas de CP, CP-15%FCC, FCC y SC a 90 D	199
Figura 5.88 Pesos de las tejas de FCC con árido silíceo – calizo y FC	201
Figura 5.89 Pesos de las tejas de SC con árido silíceo – calizo y FC	202
Figura 5.90 Pesos de las tejas de CP - CP15%FCC - FCC- SC a 28 días de curado	203
Figura 5.91 Correlación de la resistencia a flexión transversal frente a la masa de la teja	204

Figura 5.92 Espesor de las tejas de CP - CP15%FCC - FCC- SC a 28 días de curado	205
Figura 5.93 (izquierda) teja rota - (derecha) primeras fisuras en una teja con árido	206
Figura 5.94 Orificio creado luego de impactos - teja con 100% FC	206
Figura 5.95 Resistencia a impacto de tejas de CP con árido	207
Figura 5.96 Resistencia a impacto de tejas de CP con 100% FC	207
Figura 5.97 Resistencia a impacto de tejas de CP 15% FCC con árido.....	208
Figura 5.98 Resistencia a impacto de tejas de CP 15% FCC con 100% FC.....	208
Figura 5.99 Resistencia a impacto de tejas de FCC con árido	209
Figura 5.100 Resistencia a impacto de tejas de FCC con 100% FC	209
Figura 5.101 Resistencia a impacto de tejas de SC con árido	210
Figura 5.102 Resistencia a impacto de tejas de SC con 100% FC	210
Figura 5.103 Comparativo de resistencia a impacto (aparición de la primera fisura) de tejas elaboradas con (CP - CP15%FCC - FCC- SC) a 28 días de curado.	211
Figura 5.104 (arriba) Tejas de FCC en ensayo de impermeabilidad dentro de la cámara húmeda. (abajo) tejas de CP y SC vistas por el lado posterior mostrando que no hay presencia alguna de humedad ni filtración de agua.	212
Figura 5.105 Cubierta inclinada forjado / Tablero inclinado - convencional.....	214

Índice de tablas

Tabla 2.1 Evolución del parque automotor en los principales mercados del mundo.	9
Tabla 2.2 Gestión de ELT (End of Live Tyred) año 2010 - 2014-2015.....	10
Tabla 2.3 Posibles aplicaciones para el caucho reciclado de los NFU - Fuente: PNIR 2008-2015 [48],[50]	14
Tabla 2.4 Características técnicas TMC [189].....	34
Tabla 4.1 Estructura de los neumáticos en la UE.....	38
Tabla 4.2 Estructura de los neumáticos - España	38
Tabla 4.3 Composición química de los NFU	39
Tabla 4.4 Composición química del CP (% en peso), y * pérdida al fuego	39
Tabla 4.5 Composición química de catalizador gastado de craqueo catalítico (% en peso), [12]*pérdida al fuego	41
Tabla 4.6 Granulometría del catalizador usado de craqueo catalítico (FCC).....	42
Tabla 4.7 Composición química de la ceniza de cáscara de arroz (% en peso), [12] *pérdida al fuego	42
Tabla 4.8 Parámetros granulométricos de la ceniza de cáscara de arroz (CCA).....	43
Tabla 4.9 Composición química de la Escoria de alto horno SC (% en peso), [209] *pérdida al fuego	44
Tabla 4.10 Parámetros granulométricos de la escoria de alto horno SC.....	45
Tabla 4.11 Porcentaje retenido sobre la malla 0,63	49

Tabla 4.12 Distribución granulométrica de la arena de referencia CEN (Comité Europeo Normalizado).....	50
Tabla 4.13 Densidades de los áridos	53
Tabla 4.14 Determinación de la densidad de las FN, por diferencia de volumen.....	54
Tabla 4.15 valores de densidades.....	54
Tabla 4.16 valores de sustitución en volumen.....	54
Tabla 4.17 valores alcanzados de los materiales usados como precursor.....	58
Tabla 4.18 Dosificación de morteros con CP, árido SIL, CAL y FC, FT.....	62
Tabla 4.19 Dosificación de los morteros de CP con 100% FC	63
Tabla 4.20 Dosificación de morteros con CP - FCC, árido SIL, CAL y FN (FC, FT).....	63
Tabla 4.21 Dosificación de morteros de CP –FCC con 100% FC	64
Tabla 4.22 Dosificación de morteros de FCC, árido SIL, CAL y FC	65
Tabla 4.23 Dosificación de morteros de FCC –CCA con 100% FC	65
Tabla 4.24 Dosificación de la disolución activadora para morteros con árido.....	65
Tabla 4.25 Dosificación de la disolución activadora para morteros 100% FC.....	66
Tabla 4.26 Dosificación de morteros de SC, árido SIL, CAL y FC	66
Tabla 4.27 Dosificación de morteros de SC con 100% FC	67
Tabla 4.28 Dosificación - disolución activadora SC para morteros con árido	67

Tabla 4.29 Dosificación - disolución activadora SC para morteros 100% FC.....	67
Tabla 4.30 Dosificación de morteros con CP, árido SIL, CAL y FC - Placa.....	68
Tabla 4.31 Dosificación de los morteros de CP con 100% FC - PLACA.....	68
Tabla 4.32 Dosificación de morteros con CP - FCC, árido SIL, CAL y FC -Placa.....	69
Tabla 4.33 Dosificación de morteros de CP –FCC con 100% FC - Placa.....	69
Tabla 4.34 Dosificación de morteros de FCC, árido SIL, CAL y FC - Placa.....	70
Tabla 4.35 Dosificación de morteros de FCC –CCA con 100% FC - PLACA.....	70
Tabla 4.36 Dosificación de la disolución activadora para morteros con árido - Placa.....	71
Tabla 4.37 Dosificación de la disolución activadora para morteros 100% FC - PLACA.....	71
Tabla 4.38 Dosificación de morteros de SC, árido SIL, CAL y FC - Placa.....	72
Tabla 4.39 Dosificación de morteros de SC con 100% FC - PLACA.....	72
Tabla 4.40 Dosificación - disolución activadora SC para morteros con árido - Placa.....	72
Tabla 4.41 Dosificación - disolución activadora SC para morteros 100% FC - Placa.....	73
Tabla 4.42 Dosificación de morteros con CP, árido SIL, CAL y FC - teja.....	74
Tabla 4.43 Dosificación de los morteros de CP con 100% FC - TEJA.....	74

Tabla 4.44 Dosificación de morteros con CP - FCC, árido SIL, CAL y FC - teja	75
Tabla 4.45 Dosificación de morteros de CP –FCC con 100% FC - TEJA.....	75
Tabla 4.46 Dosificación de morteros de FCC, árido SIL, CAL y FC - teja	76
Tabla 4.47 Dosificación de morteros de FCC –CCA con 100% FC - TEJA.....	76
Tabla 4.48 Dosificación de la disolución activadora para morteros con árido - TEJA.....	76
Tabla 4.49 Dosificación de la disolución activadora para morteros 100% FC - TEJA.....	77
Tabla 4.50 Dosificación de morteros de SC, árido SIL, CAL y FC - teja.....	78
Tabla 4.51 Dosificación de morteros de SC con 100% FC - TEJA	78
Tabla 4.52 Dosificación - disolución activadora SC para morteros con árido - TEJA.....	78
Tabla 4.53 Dosificación - disolución activadora SC para morteros 100% FC - TEJA.....	78
Tabla 4.54 Niveles estudiados en las probetas de 4x4x16 con los diferentes morteros	79
Tabla 4.55 Niveles estudiados en las placas con los diferentes morteros.....	80
Tabla 4.56 Niveles estudiados en las tejas con los diferentes morteros.....	80
Tabla 5.1 Dap de los morteros con árido – CP – ver códigos en Tabla 4.18.....	116
Tabla 5.2 Dap de los morteros con sin árido- CP y CP 15%FCC ver códigos en la Tabla 4.19 y Tabla 4.21).....	117

Tabla 5.3 Dap de los morteros con árido – FCC-CCA- ver códigos en la Tabla 4.22.....	119
Tabla 5.4 Dap de los morteros sin árido- FCC-CCA- ver códigos en la	120
Tabla 5.5 Dap de los morteros con árido – SC- ver códigos en la Tabla 4.26.....	122
Tabla 5.6 Dap de los morteros con sin árido con matriz – SC ver códigos en la Tabla 4.27.....	123
Tabla 5.7 Flexibilidad última de morteros	167
Tabla 5.8 Valores de conductividad térmica obtenidos en ensayo	184
Tabla 5.9 Temperaturas finales a las temperaturas de 80°C y 160 °C de los morteros de CP y CAA.....	190
Tabla 5.10 Promedio de la diferencia del peso de las tejas con CP y CP 15%FCC en diferentes días de curado	200
Tabla 5.11 Pesos de las tejas de CP y CP 15%FCC	201
Tabla 5.12 Promedio de la diferencia del peso de las tejas con FCC y SC en diferentes días de curado	202
Tabla 5.13 Valores de Transmitancia térmica U - comparación de los 4 morteros estudiados en la investigación	214
Tabla 5.14 Análisis de costes unitarios de los materiales usados en la partida de obra de la cubierta inclinada	215
Tabla 5.15 Coste por m ³ de un morteros convencional de CP, y morteros geopoliméricos (FC 2) de FCC y (SC 2) de SC.....	216
Tabla 5.16 Coste de la disolución activadora para los morteros de FCC y SC usados como precursor – precio por m ³	216

1) Introducción

En septiembre de 2015 la Cumbre para el Desarrollo Sostenible aprobó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, donde se incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para poner fin a la pobreza, luchar contra la desigualdad y la injusticia, y hacer frente al cambio climático.[1],[2]

Los objetivos 11, 12, y 13 nos señalan que no es posible un desarrollo sostenible sin transformar drásticamente la forma en la que construimos, y este estudio pone el interés en la utilización de materiales de construcción más sostenibles, como son los composites con fibra de neumático fuera de uso (NFU), así como la reutilización de residuos industriales como el catalizador de craqueo catalítico (FCC la ceniza de cáscara de arroz (CCA) y la escoria de alto horno (SC) para reducir la huella ecológica mediante un cambio de los métodos de producción, disminución

y reciclado de los desechos. Finalmente debemos tener en cuenta, que uno de los principales gases de efecto invernadero es el dióxido de carbono, y que la industria del cemento portland genera entre el 5 y 7% del total de dióxido de carbono emitido a la atmósfera, por lo que se trata de una actividad muy contaminante [3],[4]. La sustitución total o parcial del cemento portland por adiciones minerales reactivas como el FCC, SC, etc. supone una reducción de la huella de carbono.

El progresivo aumento de la cantidad de residuos de caucho producido a partir de neumáticos usados se ha traducido en un problema ambiental. Según los informes de las mayores asociaciones de fabricantes de neumáticos y productos de caucho, la producción mundial de neumáticos es de alrededor de 1400 millones de unidades anualmente, lo que corresponde a un estimado de 17 millones de toneladas de neumáticos usados cada año. El dinámico crecimiento en el número de neumáticos usados está bien ejemplificado por la UE, donde la producción aumentó de 2,1 millones de toneladas en 1994 a 3,3 millones de toneladas en 2010, y el costo anual de su eliminación en países de la UE se ha calculado en cerca de 600 millones euros [5]. La generación de residuos es inevitable; por consiguiente, es indispensable contar con sistemas de gestión ambiental racionales que reduzcan al mínimo la generación de residuos y que aprovechen al máximo la reutilización y el reciclado, o sino, recuperar la energía y el material de los neumáticos de desecho, esto es, la valorización [6],[7].

En la UE trabajan bajo el sistema Extended Producer Responsibility (EPR) que abarca a unos 15 países, el cual parece ser el sistema más adecuado y sólido para afrontar y resolver los problemas que surgen de los NFU de una manera sostenible logrando una tasa de recuperación del 100%. En el caso español SIGNUS es quien se encarga del cumplimiento de la gestión ambientalmente racional del FNU [6],[8].

Una muestra en Latinoamérica se ve en el caso de Brasil donde en el año 2003 se produjeron 18,3 millones de neumáticos para el mercado, donde la demanda de neumáticos usados

(recauchutados) fue muy alta debido al bajo poder adquisitivo y al precio alto del neumático nuevo, además en los años siguientes se incrementó la importación de neumáticos usados llegando a importarse hasta 7 millones de unidades el año 2007 [9].

El recauchutado es una alternativa a la gestión de NFU aprovechándose la carcasa del neumático sustituyendo las gomas gastadas de la banda de rodadura y hombro para hacer una reconstrucción de su estructura original, [7] en este proceso de valorización, fundamentalmente en la etapa del raspado se crean residuos en forma de fibras y partículas de neumático. En esta tesis doctoral se han utilizado las fibras producto de este proceso industrial.

La reacción química de una fuente de aluminosilicato (precursor) con una disolución muy alcalina (activador) produce un conglomerante denominado cemento activado alcalinamente (CAA) o geopolímero.

Este tipo de material puede proporcionar un rendimiento semejante al de los aglutinantes de cemento convencionales, con una ventaja adicional para medio ambiente que es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. [10],[11]

Por lo antes expuesto, en esta tesis doctoral, se pretende estudiar la valorización de FN como agregado ligero en morteros de base de cemento portland (CP) y cemento activado alcalinamente (CAA) [12], [13]. Estudios previos realizados por otros investigadores en morteros y hormigones de cemento portland con FN demostraron una disminución de la densidad aparente en seco a medida que aumentan los contenidos de FN [14],[15], [16],[17]. Además, han identificado una pérdida de resistencia mecánica, en resistencia de flexión y compresión, incluso mediante el uso de fibras[18]–[24]

Esta consecuencia se puede atribuir a la poca o nula adherencia entre la matriz y las partículas de caucho [25],[26]. Sin embargo, otras propiedades como las de tipo térmico han atraído la curiosidad de otros investigadores. [27], [28].

En el presente trabajo, se evaluaron las propiedades mecánicas y físicas de composites de matriz de CP y CAA preparados a partir de CP, FCC y SC con refuerzo de FN, para finalmente aplicarlos en la fabricación de elementos prefabricados no estructurales (tejas) que fueron testados para corroborar que cumplan las mínimas exigencias requeridas para su uso.

1.1 Hipótesis

Las fibras provenientes de los neumáticos fuera de uso pueden usarse en sustitución del árido en la fabricación de morteros, mejorando sus propiedades físicas y aplicarse como un nuevo material de construcción en elementos prefabricados no estructurales, tanto con matrices de cemento portland como en matrices de activación alcalina.

1.2 Estructura de la tesis.

La estructura de esta tesis doctoral está planteada bajo el método científico y propone una metodología basada en la realización de experiencias que impliquen la preparación de morteros de matriz cementicia y geopolimérica que incorporen estos residuos de caucho en forma de fibras de neumático, evaluando las propiedades físicas, mecánicas y térmicas.

Capítulo 1: Presenta la descripción general del tema a investigar y la estructura interna de la tesis.

Capítulo 2: El estado del arte sobre aspectos medioambientales de los NFU, sobre investigaciones relacionadas con el uso de NFU en morteros y hormigones y los antecedentes existentes en morteros de activación alcalina y sus posibles aplicaciones en esta investigación.

Capítulo 3: Se presenta de forma clara y breve el objetivo general y los objetivos específicos de la tesis doctoral

Capítulo 4: Se describen los materiales, equipos y los procedimientos experimentales usados en la investigación

Capítulo 5: Se recogen los resultados y se realiza la discusión sobre el trabajo realizado con las fibras de neumático usadas en la fabricación de morteros de CP y CAA, la validación de ensayos realizados, así como los resultados sobre las propiedades medidas a las tejas fabricadas con estos nuevos materiales.

Capítulo 6: Las conclusiones generales.

Capítulo 7: Las propuestas para líneas futuras de investigación

Capítulo 8. Son listadas las referencias científicas citadas en la presente tesis doctoral.

2) Estado del arte

2.1 Contexto medioambiental

Proteger el medio ambiente de los efectos de la contaminación generada por los residuos industriales es una tarea a trabajar y a tener en consideración por todos los gobiernos. En los objetivos de desarrollo del milenio (OM) se establecieron 8 líneas y dentro de los cuales está el objetivo 7: “*garantizar la sostenibilidad del medio ambiente*”, donde los recursos naturales básicos y los ecosistemas se deben de gestionar de forma sostenible. De igual forma el año 2015 los estados miembros de la ONU aprobaron la agenda para el año 2030 para el desarrollo sostenible, el cual consta de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible donde se menciona lo urgente que es adoptar medidas para combatir el cambio climático y sus efectos.

La presencia de los residuos, tanto domiciliarios como industriales, son una preocupación de décadas, puesto que su producción se mantiene con el transcurso de los años, representando una pérdida de materiales y energía importantes. La generación de estos residuos, así como la peligrosidad que algunos de ellos conllevan, constituyen una agresión creciente al medio ambiente y a la salud pública.

Dicho esto, se plantean estrategias de Desarrollo Sostenible, tanto en la Unión Europea (UE) como en los países de América Latina y el Caribe (ALC), firmes en la posición de establecer y elaborar planes que permitan mejorar perennemente la calidad de vida, siendo uno de los objetivos dentro de la estrategia de sostenibilidad ambiental el reducir la generación de residuos y fomentar la reutilización y el reciclaje de los generados [29]–[31]

2.2 La industria del neumático

Los neumáticos son un elemento fundamental para la circulación de un vehículo ya que es lo que va en contacto entre el mismo y la calzada influyendo en su comportamiento dinámico, confort, estabilidad y seguridad. Es un elemento con un diseño elevado en tecnología y fabricación, de aquí la importancia de los materiales con que se elaboran. El aumento del transporte (automóvil), sobre todo en países desarrollados, y cada vez más en países en desarrollo, nos indica que el uso del neumático estará presente y en crecimiento y, por lo tanto, una vez utilizado, su desecho se acumulará en cualquier parte del mundo. Entonces, el uso y eliminación de estos elementos es muy importante, ya que puede tener efectos sobre el medio ambiente y la salud de las personas.[32][33]

La fabricación de neumáticos en los últimos años ha ido en aumento, tanto es así que los datos proporcionados por las asociaciones de fabricantes de neumáticos y productos de caucho en los últimos años muestra que la producción anual mundial fue de alrededor 1400 millones de unidades de neumáticos, que corresponde alrededor de 17 millones de toneladas de neumáticos usados anualmente. Dentro de la UE

también se ve reflejado este crecimiento donde la producción aumentó de 2,1 millones de toneladas en 1994 a 3,3 millones de toneladas en 2010, lo cual se tradujo en un gasto de eliminación de cerca de 600 millones de euros por año [5], [8]. El problema se ve reflejado por los vertederos peligrosos para el medio ambiente, en los que unos 4000 millones de neumáticos se encuentran almacenados. Estos vertederos son de hecho una seria amenaza para el medio ambiente y la salud humana debido al riesgo de incendio y también porque se convierte en un hábitat adecuado para roedores, serpientes y mosquitos.

Tabla 2.1 Evolución del parque automotor en los principales mercados del mundo.
Fuente en millones de automóviles [34]

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2018	2021	2024
África	12	12	13	14	14	5	16	18	20	23
ASEAN	22	24	25	27	29	31	33	38	43	48
Asia oriental	77	78	79	80	81	83	84	86	87	87
Medio oriente	32	37	40	42	44	46	47	53	59	66
Oceanía	15	15	16	16	16	17	17	18	19	20
América del sur	44	47	50	53	56	58	59	63	68	74
Europa	301	305	311	315	319	323	326	334	342	349
China	39	50	61	74	90	107	125	184	246	305
India	18	20	22	25	27	29	31	38	47	58
NAFTA	233	230	234	234	237	241	245	256	265	274

En el contexto latinoamericano una muestra se ve en el caso de Brasil donde todavía en el año 2003 produjeron 18,3 millones de neumáticos para el mercado, donde la demanda de neumáticos usados es muy alta debido al bajo poder adquisitivo y al precio alto del neumático nuevo,[9], a esto se suma el incremento de la importación de neumáticos usados llegando a importarse hasta 7 millones de unidades el año 2007.

En la Unión Europea se han realizado políticas basadas en la responsabilidad ampliada al productor EPR (Extended producer responsibility) con el fin de mejorar el comportamiento ambiental de los productos y servicios a través de sus ciclos de vida que abarca a unos 21 países al año 2016. Parece ser un sistema adecuado y sólido para confrontar y resolver los problemas que

surgen de los NFU de una manera sostenible logrando una tasa de recuperación del 100%.

Tabla 2.2 Gestión de ELT (End of Live Tyred) año 2010 - 2014-2015
En miles de toneladas [35]

País	neumáticos usados	La reutilización de neumáticos parcialmente gastados	Neumáticos de desecho generados	recuperación de neumáticos de desecho	La recuperación total	Los neumáticos usados tratados (%) AÑO 2010	Los neumáticos usados tratados (%) AÑO 2014	Los neumáticos usados tratados (%) AÑO 2015
Austria	60	10	50	50	60	100	100	100
Bélgica	82	13	69	69	82	100	100	100
Bulgaria	20	0	20	0	0	0	78	76
Chipre	8	0	8	0	0	0	0	0
República Checa.	57	2	55	38	40	70	68	68
Dinamarca	38	1	37	37	38	100	100	100
Estonia	10	0	10	9	9	90	100	100
Finlandia	41	1	40	40	41	100	96	96
Francia	381	79	302	302	381	100	96	93
Alemania	614	139	475	475	614	100	100	100
Grecia	49	2	47	42	44	90	100	100
Hungría	30	1	29	29	30	100	97	88
Irlanda	35	7	28	25	32	91	91	80
Italia	426	55	371	280	335	79	100	100
Letonia	10	0	10	9	9	90	53	56
Lituania	11	0	11	9	9	82	94	94
Malta	1	1	0	0	1	100	100	100
Países Bajos	65	15	50	50	65	100	100	100
Polonia	239	20	219	219	239	100	88	69
Portugal	92	21	71	71	92	100	100	100
Rumania	33	0	33	33	33	100	100	100
Eslovaquia Con.	23	1	22	22	23	100	83	89
Eslovenia	11	0	11	11	11	100	100	100
España	292	58	234	234	292	100	100	100
Suecia	79	1	78	78	79	100	100	100
Reino Unido	465	130	335	326	456	98	97	98
Noruega	51	2	49	49	51	100	100	100
Suiza	50	15	35	35	50	100	100	100

En la Tabla 2.2 se ve los avances realizados en la recuperación de los NFU en los últimos años dentro de la UE, llegando a cifras de 100% de la recuperación de los NFU.

En el caso español SIGNUS es quien se encarga del cumplimiento de la gestión ambientalmente racional del FNU [32] [36]–[39]

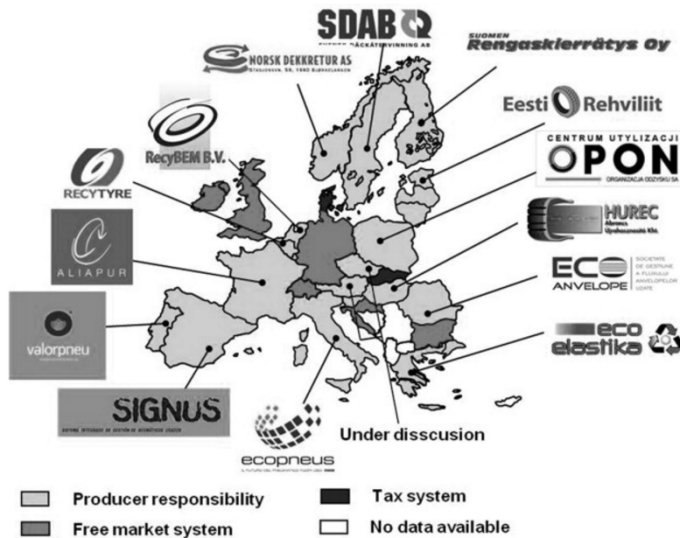


Figura 2.1 Modelos para la administración de la gestión de los neumáticos fuera de uso en el Europa, que muestra las mayores organizaciones de recuperación / reciclaje que operan en países de la UE (ETRMA, 2010a) [5]

2.2.1 Generación y gestión del neumático fuera de uso

Un neumático es un volumen tórico en el que se introduce aire a presión. Está compuesto por un conjunto de telas engomadas superpuestas, soportadas por una estructura de hilos metálicos y textiles (carcasa) sobre las cuales se dispone una banda de caucho que es la banda de rodadura.[7]. Cada automóvil sale de fábrica con unos 30 o 40 kg de cauchos, acero y otros materiales textiles, cuya vida útil será de unos 2 - 3 años antes de su sustitución. Así, para una vida media de 11 – 12 años de cada

vehículo, se utilizarán unos 3 juegos de neumáticos, lo que implica que cada vehículo genera al año 10 kg de residuos de neumáticos gastados.[7]

El aumento continuo de la cantidad de residuos de caucho producido a partir de neumáticos usados se ha traducido en una dificultad ambiental, es así que la gestión de neumáticos fuera de uso (NFU) para muchos países industrializados se ha convertido en un problema.

Aunque en los últimos años la gestión de los NFU ha significado que los neumáticos usados hayan sido percibidos como una fuente de materia prima y aun siendo un residuo no peligroso en sí, su eliminación de manera incorrecta es capaz de contaminar gravemente el medioambiente.



Figura 2.2 Incendio en Cementerio de neumáticos de Seseña - Madrid - 05 – 2016 [40]

La generación de residuos provenientes de los NFU es una realidad que se incrementa de forma preocupante por lo que, es preciso contar con sistemas de gestión ambiental racional que minimicen la generación de residuos y optimicen la valorización [6], [7].

Se han desarrollado estudios sobre su recuperación y reciclaje más eficiente, normas legales dentro de la UE en relación con la gestión de los neumáticos fuera de uso, que han dado lugar a soluciones que permiten que los desechos de caucho puedan ser convertidos en energía o nuevos materiales poliméricos [33], [36], [37], [41]–[47].

En el caso español, la Ley 10/1998 de residuos [48] especifica la estructura general para el tratamiento de los residuos generados por la sociedad. En España se producen al año grandes cantidades de residuos procedentes de los NFU que varían alrededor de 230.000 Tm y 300.000 Tm [7]. En ese sentido y prestando especial atención el marco legal regulado para los NFU cabe enfatizar los principios de gestión establecidos en la ley antes descrita donde un punto primordial es el principio de jerarquía contemplado en el artículo 1.1 de dicha ley:

Artículo 1.1 Esta Ley tiene por objeto prevenir la producción de residuos, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión y fomentar, por este orden, su reducción, su reutilización, reciclado y otras formas de valorización, así como regular los suelos contaminados, con la finalidad de proteger el medio ambiente y la salud de las personas.

Los objetivos de gestión del II Plan Nacional de neumáticos fuera de uso [48], establecen las alternativas ecológicas para la gestión de los NFU. La alternativa a la opción del depósito en vertederos puede seguir 3 líneas posibles.

- Recauchutado de NFU: por el que se aprovecha la carcasa del neumático. Si los neumáticos están todavía en buen estado, pueden revestirse de una nueva superficie de rodadura.
- Tratamiento y Valorización del material del NFU: Destinado a su reciclado para la obtención de materias primas utilizadas en otros procesos de producción industrial. Enteros, troceados, molidos, los neumáticos pueden ser reutilizados y valorizados en diversas aplicaciones. Pueden

destacarse las aplicaciones en arrecifes artificiales de neumáticos enteros para evitar la pesca furtiva, como aislante térmico y acústico de los neumáticos triturados, o las aplicaciones en materiales bituminosos.

- **Valorización energética:** Para la generación de energía del NFU, ya que el neumático tiene una capacidad calorífica alta (7500Kcal/kg) superior al carbón y menos contaminante por su bajo contenido de azufre, usado como combustible en centrales eléctricas, cementeras, etc.[7],[15], [47]–[50]

Existen muchas posibilidades de empleo de este material en España, pero no se aprovecha todo el potencial que se tienen de los NFU siendo las cantidades usadas en aplicaciones de reutilización inferiores al volumen generado. En la Tabla 2.3 se muestra las posibilidades de aplicación de NFU

Tabla 2.3 Posibles aplicaciones para el caucho reciclado de los NFU - Fuente: PNIR 2008-2015 [48],[50]

Aplicaciones ya implantadas en el mercado	Aplicaciones en fase de desarrollo	Aplicaciones potenciales
Campos de hierba artificial.	Betunes y mezclas bituminosas para pavimentos de carreteras.	Construcción de taludes.
Pistas de atletismo.	Morteros de cemento con caucho.	Arrecifes artificiales.
Otros pavimentos deportivos.	Decoración vegetal.	Sellado de vertederos.
Aislantes acústicos y antivibratorios.	Pavimentos para deportes hípicos	Colchones para ganado.
Industria del calzado.		Polímeros termoplásticos.
Industria automovilística.		S.A.R caucho activado superficialmente

2.2.2 El recauchutado de neumáticos

El recauchutado, también llamado reencauchado o renovado de neumáticos es el proceso por el cual se procede a la sustitución de las gomas gastadas de la banda de rodadura y hombro para hacer una reconstrucción de su estructura original [7].

2.2.2.1 Proceso de recauchutado.

Los tipos de recauchutado se clasifican atendiendo al sistema de adhesión de las nuevas gomas distinguiéndose 2 tipos:

- Recauchutado en caliente: Es un proceso de vulcanización que se realiza en prensa a una temperatura entre 150 – 160 °C aproximadamente durante 120 minutos.
- Recauchutado en frío: La banda de rodamiento está previamente vulcanizada y se adhiere mediante una goma (unión), vulcanizándose en autoclaves a una temperatura comprendida entre 98 – 125 °C durante aproximadamente 200 minutos. [7]

En la Figura 2.3 se muestra las diferentes etapas del proceso de recauchutado, que son las siguientes:

- a) Preparación del neumático: limpieza e inspección:
- b) Preparado de la superficie: raspado y torneado:

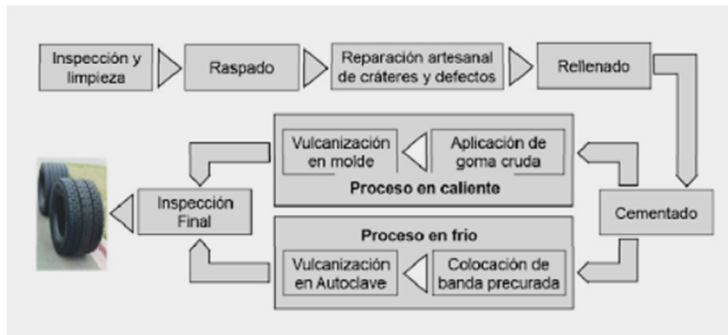


Figura 2.3 Etapas en el proceso del recauchutado. [7]

- c) Reparaciones artesanales: cráteres.
- d) Preparación de la superficie- cementado y rellenado.
- e) Recauchutado por embandado en frío.
 - Preparación y colocación de la banda pre curada.
 - Vulcanización en autoclave.
- f) Recauchutado por moldeo en caliente.
 - Colocación de goma cruda en caliente.

- Vulcanización en moldes.
- g) Control de calidad.

2.2.2.2 El raspado en el recauchutado

Es una operación crítica que tiene por finalidad darle al neumático gastado la geometría ideal siguiendo patrones preestablecidos para esa medida y tipo de cubierta por los respectivos fabricantes, a la vez que se logra una superficie pulida, uniforme y de textura adecuada.

En cuanto a la generación de residuos esta etapa es la más significativa, ya que es en este momento cuando se genera la mayor cantidad de residuos. Los residuos generados se obtienen en forma de fragmentos de caucho mayoritariamente con forma alargada (fibra). Estos fragmentos son los que se utilizarán en la presente investigación.

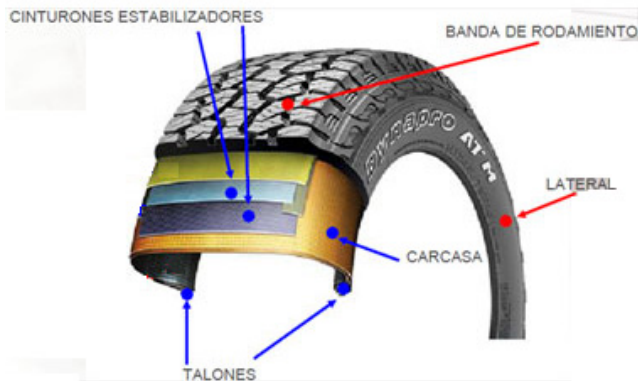


Figura 2.4 Estructura del neumático.[51]

2.2.3 Alternativas a la gestión de neumáticos

En muchos países en desarrollo que no se cuenta con sistemas de gestión, los NFU se convierten en materia prima para dar alternativas artesanales o poco industrializadas y darle una nueva vida a este material de difícil tratamiento medioambiental.

Es así que se podría pensar que los NFU no puedan utilizarse para crear alternativas funcionales, útiles, valiosas, artísticas y sobre todo respetuosos con el medioambiente, pero las respuestas pasan desde la creación de sandalias o piezas de mobiliario y esculturas, e incluso hasta para poder ser usado en la construcción de muros de contención, escaleras, pozos sépticos y hasta de una vivienda.

Dentro de las alternativas más generalizadas en forma de trabajo artesanal, es la fabricación de suelas de calzado, y de sandalias.



Figura 2.5 Sandalias artesanales hechas con NFU. [52], [53]

El mobiliario dentro de una vivienda, así como el mobiliario urbano y las expresiones artísticas es otra alternativa para ser usado

Utilización de residuos de Neumáticos Fuera de Uso en conglomerantes con base cemento portland y de activación alcalina para uso en prefabricados de bajo coste económico y medioambiental



Figura 2.6 Mobiliario dentro de casa [54]



Figura 2.7 Mobiliario dentro de casa - mobiliario urbano [54]



Figura 2.8 Mobiliario urbano [54]

El NFU sin perder su morfología es usado en la construcción, como muros de contención, escaleras o pozos sépticos. Uno de los casos en el que se ha desarrollado toda una metodología de construcción es la del arquitecto Michael Reynolds, quien usa los neumáticos para la construcción de viviendas pasivas o “Earthship” [55]–[59]



Figura 2.9 Muro de contención hechos con NFU [54]

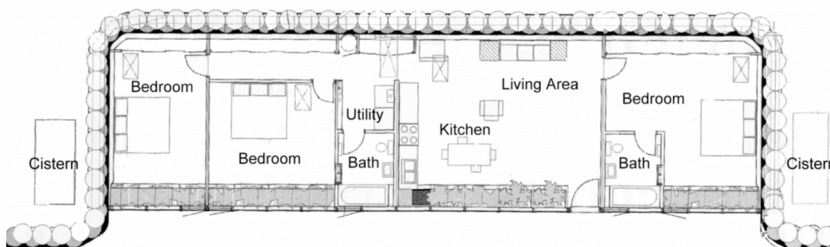


Figura 2.10 Planta de la vivienda diseñada por Michael Reynolds [55]–[59]



Figura 2.11 Vivienda en Nuevo México construida con NFU – Michael Reynolds [55]–[59]

2.3 Matrices cementicias fibroreforzadas.

Dentro del campo de los materiales de construcción, existe una búsqueda constante por mejorar las características de las matrices cementicias, así como también la posibilidad de aplicar distintos tipos de fibras para mejorar sus esfuerzos. La aplicación de fibras sintéticas es parte también de estas investigaciones existiendo algunas cuyos resultados han sido aprobados y puestos en uso comercial como es el caso del polipropileno.

En el caso de materiales de matriz cementicia es bien conocido que tienen un buen comportamiento ante esfuerzos de compresión, pero casi nula para resistir tracción. Los primeros planteamientos de refuerzo para mejorar su resistencia a tracción se dieron a mediados del S.XIX con la incorporación de barras de acero iniciando así el uso del hormigón armado [60]. En los años siguientes son varios los autores que patentaron sus trabajos donde reforzaban hormigones con mallas de acero desarrollando incluso nuevos sistemas constructivos [61] llegando al punto de eliminar el árido y reforzar la matriz solo con fibras de asbesto, naciendo así el asbesto-cemento o fibrocemento empleándose principalmente para fabricar placas onduladas para cerramientos superiores, paneles de fachadas ventiladas, tubos y conductos en general. Pero en el año 2004 más de cien países, representantes de todos los continentes, firmantes del Convenio de Róterdam, acordaron prohibir el asbesto [62] por sus efectos cancerígenos.

Dejando de lado el uso del asbesto, su prohibición en los países desarrollados y en desarrollo, ha favorecido la aparición de nuevas alternativas de fibras para su uso en matrices cementicias: desde las de acero y vidrio, hasta las producidas en carbono, fibras artificiales como las de polipropileno, poliamida o nylon y naturales como la de celulosa, sisal, yute, coco, etc. [62] también con la incorporación de aquellas fibras que proceden del reciclaje de residuos de difícil gestión tanto industrial como doméstico [63], [64]

Para trabajar con las matrices fibroreforzadas debemos de tener en consideración las características de la matriz a fibroreforzar, y por otro las características de la fibra a emplear, además de la sinergia entre ambos materiales. Igualmente conocer, resistencias y deformaciones individuales y conjuntas, y, también el tipo y grado de adherencia entre ambos para que se comporten como un nuevo material.

2.4 Conglomerantes con residuos de NFU

Dentro de las posibles aplicaciones del caucho procedente de NFU se encuentran los morteros de cemento portland con la incorporación de estos residuos. Esta aplicación ha sido ampliamente estudiada, creciendo el interés por los investigadores en los últimos años. [6], [14], [17]–[23], [25], [59]–[81]

Las propiedades elásticas del caucho, su resistencia al impacto y baja densidad, son características frecuentemente deseadas en morteros y hormigones. El uso del caucho procedente de NFU en materiales de base cemento portland puede reducir la fragilidad y mejorar las propiedades térmicas y acústicas de estos materiales, además de ser una alternativa limpia a la gestión de este material nocivo para el medio ambiente.

Algunas características estudiadas propias de este material podemos verlas analizadas en los siguientes sub capítulos. [14], [18], [19], [22], [25], [26], [65]–[69], [72]–[79], [81]–[85], [87]–[94]

2.4.1 Trabajabilidad

Resulta complejo evaluar esta propiedad y en ocasiones es además subjetivo. La trabajabilidad es el resultado de la concurrencia de otras propiedades del material en estado fresco tales como plasticidad, consistencia, retención y exudación de agua, masa específica, cohesión interna, adhesión y velocidad de endurecimiento, además, del tamaño de partícula a usar.[15], [50]

En general y siguiendo las experiencias anteriores, la trabajabilidad empeora cuando se emplean agregados de caucho en morteros mientras que aumenta cuando se emplea en hormigones. No obstante, el tamaño y la forma del agregado de caucho influyen en la trabajabilidad [95],[96]. La incorporación de caucho en hormigones, morteros o pastas causa una disminución del peso unidad en estado fresco.

2.4.2 Densidad

La densidad del mortero y hormigón disminuye cuando el porcentaje de caucho en partículas aumenta. La reducción del peso de la unidad se debe al menor peso unitario de partículas de caucho que reemplazan el agregado grueso y fino que es más denso. Por lo tanto, los morteros con caucho de NFU pueden ser una solución alternativa en aplicaciones de construcción de morteros y hormigón ligeros.

2.4.3 Propiedades mecánicas.

La bibliografía consultada pone de manifiesto que en general la incorporación de caucho produce una disminución de las resistencias mecánicas. Sin embargo, se alcanzan mayores deformaciones que en hormigones y morteros convencionales. [14], [15], [18], [22], [65], [72], [81]

La disminución de resistencia a flexión no es tan importante como la resistencia a compresión. Influyen el tipo y el tamaño de partículas de caucho en el orden de magnitud. Incluso algunos intentan trabajar con modelos para estimar la reducción de resistencia que supone la incorporación de caucho en la composición. [65], [77], [97]–[100]

Existe una relación directa entre el detrimento de resistencia a compresión frente a la densidad, la cual disminuye al aumentar la cantidad de caucho en la composición de materiales con base cemento portland. Para una misma densidad, la reducción de resistencia es mayor en hormigones que en pastas y en morteros. [19],[64],[91],[93],[101]

La bibliografía nos advierte que el detrimento de resistencias está relacionado con la menor adherencia entre la fibra y la matriz, la diferencia de módulo elástico entre las partículas de caucho y la matriz, llegando a considerar en algunos casos a las partículas como inclusiones o poros reduciendo la sección efectiva del material. [19] A pesar de todo también se considera que las partículas de caucho dentro de la estructura de la matriz contribuyen a la transmisión del esfuerzo. [97]

- Esta pérdida de resistencias ha intentado ser mitigada mediante tratamientos previos en los agregados de caucho:
- Para eliminar cualquier contaminante y tener una superficie homogénea, se lava con agua minuciosamente el agregado. [102]
- El uso de tetra cloruro de carbono (CCl_4) tuvo un resultado favorable en hormigones. Pero por la toxicidad de este solvente fue retirado de la industria [103]
- Se han realizado también tratamientos previos a las partículas de caucho con NaOH para obtener mayor adherencia de las partículas a la matriz de cemento portland cuando son incorporadas en pastas de cemento. [79] y otro caso utiliza también NaOH y un producto comercial llamado silano A- 174 ($\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_5\text{Si}$) en partículas de caucho en hormigones. Estos tratamientos no resultaron exitosos. [49], [104],[105].
- En resumen, en las experiencias consultadas, los tratamientos previos a los agregados de caucho, hacen poco atractivo técnica y económicamente sus usos.

Por otro lado, se destaca la importancia de la textura alveolar de las partículas de caucho. Las partículas con textura alveolar, muestran mayor cantidad de mortero alrededor de cada partícula de caucho, alcanzando mayor resistencia y módulo elástico que las partículas lisas, [106]

2.4.4 Comportamiento acústico.

Varios investigadores destacan la peculiaridad de los morteros y hormigones con caucho para atenuar vibraciones y absorber sonido, [16], [106], [107]. En algunos ensayos llevados cabo se analizó la velocidad de la onda ultrasónica, para investigar la absorción de sonido y el módulo de elasticidad dinámico. Los resultados indican que el material es adecuado para absorber sonido y disipar la energía asociada a vibraciones.[93]

La diversidad de granulometrías de los residuos de caucho usado en hormigones influye en el comportamiento de atenuación de la velocidad de la onda de ultrasonido. De los datos consultados, en experiencias anteriores es posible concluir que se observan mayores valores de atenuación en los compuestos donde el caucho tiene el tamaño de las partículas más pequeñas, ya que muestran mayor presencia de porosidad, hecho que influye directamente en la propagación de los ultrasonidos, con una atenuación mayor y una menor velocidad de propagación [104].

Las diferencias de densidad, entre hormigón con caucho, y hormigones convencionales influye también en la velocidad de onda de ultrasonido obtenida, siendo mayor la velocidad a mayor densidad [108].

2.4.5 Comportamiento térmico

El comportamiento térmico es uno de los puntos importantes en este tipo de estudios. Las experiencias anteriores nos muestran que usando diferentes granulometrías y dosificaciones (incluso con sustituciones de 100% de árido por caucho) ya sea en hormigones, morteros o pastas se alcanzan diferentes valores de conductividad térmica. En los trabajos consultados se han intentado conseguir materiales más ligeros y con menor conductividad térmica, tratando de no reducir en exceso las resistencias mecánicas a compresión. De las mezclas desarrolladas, los resultados de ensayos de conductividad

térmica y resistencia a compresión, muestran resultados con valores similares a productos de construcción actualmente en el mercado [15], [16], [109].

Tanto la cantidad de partículas de caucho como la relación agua conglomerante afectan a las variaciones de valores de conductividad térmica. La conductividad térmica disminuye al aumentar la cantidad de caucho y de la misma forma al aumentar la cantidad de agua en las probetas disminuye la conductividad térmica. Estos resultados nos indican que la conductividad térmica no está únicamente influenciada por las características de los componentes sino también por su red de poros [110], [111].

Por lo antes expuesto podemos concluir que la adición de partículas de caucho en mortero de cemento portland como árido reduce los valores de conductividad térmica de este material y por ende se trataría de un material atractivo para ahorrar energía usado en edificación, [15], [16], [27], [70], [107], [108], [111]–[119].

2.5 La industria del cemento y la activación alcalina

La industria de la construcción es una de las más potentes a nivel mundial, la cual demanda gran cantidad de materias primas muchas de ellas no renovables. Uno de estos materiales es el cemento Portland, que al reaccionar con el agua forma un conglomerante que es el más usado en el mundo de la construcción. ¿Y por qué? fundamentalmente se debe a la gran disponibilidad de materias primas para su elaboración, al costo accesible y sus óptimas propiedades mecánicas y de durabilidad.

En los últimos años la producción mundial del cemento se ha incrementado, llegando en el año 2012 a 3600 Mt, o en el año 2014 a 4180 Mt según las estadísticas del U.S. Geological Survey (USGS), incrementándose así un 21% dentro del periodo 2010 -2014.[120],[121] Según los datos proporcionados por la Agrupación de fabricantes de cemento en España (OFICEMEN),

en el 2013 la producción de cemento nacional llegó a 12.218.492 t [122].

Aun siendo un material que cuenta con un bajo costo económico en lo que a materia prima se refiere, su fabricación es un proceso altamente costoso desde el punto de vista energético y medioambiental, siendo el responsable del 12-15% del consumo total de energía a nivel industrial [123] [124] Al mismo tiempo, que consume una gran cantidad de recursos naturales y liberan grandes cantidades de CO₂ a la atmosfera, alrededor de 900 kg de CO₂ por cada tonelada de cemento producido [125] lo que establece alrededor del 5-7% de la emisión mundial de CO₂, [3],[4], [123], [126],[127].

Conociendo los perjuicios que causa la industria del cemento al medio ambiente, la comunidad científica a veces de la mano con la propia industria del cemento, ha ido efectuando numerosos estudios con el objetivo de reducir los problemas medioambientales, mejorando equipos en el proceso de fabricación, usando combustibles alternativos que reemplacen a los combustibles fósiles.[3],[128][129], iniciando la producción de cementos compuestos para reemplazar parcialmente el clinker por materiales cementantes suplementarios como cenizas volantes o escoria de alto horno [130],[131]. También se puede reemplazar por piedra caliza, puzolanas naturales y humo de sílice [132],[133].

Otra de las opciones investigadas han sido los conglomerantes alternativos con bajas emisiones de CO₂, tales como los cementos belíticos o los cementos de sulfoaluminato de calcio ,[11], [134]–[138]. También se han intentado fabricar materiales con sustitución de parte del cemento portland por residuos de carácter puzolánico, con los que además se intenta valorizar y reutilizar residuos de otras industrias. Entre estas opciones analizadas, se han estudiado subproductos industriales como el humo de sílice [139]–[141] escorias de alto horno [142], cenizas volantes [143], materiales cerámicos [20], catalizador gastado de craqueo catalítico [132]–[135], residuos de vidrio [144], etc. y subproductos agrícolas como la ceniza de cáscara de arroz

[145],[146] o la ceniza de bagazo de caña de azúcar [147],[148] entre otros, que han sido incorporados tanto como sustitución o adición al cemento Portland en la producción de morteros y hormigones [149]–[153].

Además de las investigaciones que parten del análisis del cemento portland, existe otra línea de investigación relacionada con nuevos materiales, otro tipo de conglomerantes que son los llamados cementos activados alcalinamente, cuyo rendimiento es semejante al cemento tradicional [4], [154]–[157].

El concepto de material activado alcalinamente se remonta al año 1908 cuando Kühl patentó una combinación de escoria vítrea con un sulfato o carbonato alcalino[158]; ya en el año 1930 publica una investigación acerca del fraguado de las escorias con soluciones de hidróxido de potasio (KOH) [159] La durabilidad de este material ha sido estudiada y probada durante varias décadas en diferentes países como Bélgica, Finlandia, la antigua URSS, China y más recientemente en Australia. Es así que a partir de los años 90 se incrementa en número y calidad las investigaciones respecto a estos materiales [10], [160], [161].

El año 1957 Glukhovsky identifica unas nuevas zeolitas del tipo de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y de aluminosilicatos de calcio y sodio hidratado. De esta manera introdujo el nombre “soil cements” y también empleó el término “cemento alcalino” que se desarrolló a partir de la activación alcalina de escoria de alto horno [159],[162][163].

Davidovits, el año 1970, desarrolló sistemas de activación alcalina de materiales basados en caolín (K) y metacaolín (MK). La mezcla de este aluminosilicato sólido con una solución altamente alcalina constituida por hidróxidos y/o silicatos, producen los materiales conocidos como “geopolímeros”[164].

Habiendo examinado la historia de estos nuevos materiales, podemos ver que se ha generado un gran interés por parte de la comunidad científica, ya que gran parte de la materia prima primordial para la formación de estos conglomerantes activados alcalinamente son materiales basados en $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$; materiales que son abundantes en la superficie terrestre, tanto en forma

natural como en forma de residuos agrícolas y/o industriales [165],[166].

A modo de resumen podemos decir que la reacción de una mezcla mineral de aluminosilicato, llamado precursor con un hidróxido alcalino acuoso altamente concentrado y / o solución de silicato, llamado solución activadora, produce una estructura de aluminosilicato alcalino llamado geopolímero [10], [167], [168]. Este tipo de material puede proporcionar un rendimiento comparable al de los conglomerantes de cemento convencionales pero más amigable medioambientalmente ya que puede suponer una significativa reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [11], [169].

2.5.1 Matrices de CAA fibroreforzadas.

Para los CAA, también se han producido investigaciones con el fin de incorporar diferentes tipos de fibras en hormigones y morteros para mejorar sus características mecánicas, al igual como sucede con el CP, aunque las publicadas son muy recientes. Los resultados encontrados son buenos, obteniéndose mejoras en sus propiedades mecánicas de compresión y tracción. La gran parte de trabajos usan residuos industriales como material precursor a activar tales como escorias de alto horno o ceniza volante y no habiendo todavía experiencias con residuos agrícolas como ceniza de cáscara de arroz u otros precursores mencionados en el capítulo 2.5. [170]–[177].

2.5.2 Conglomerantes en base CAA con residuos de NFU

Viendo el impacto negativo que generan al medio ambiente la industria del cemento y la de los neumáticos, la comunidad científica busca soluciones para mitigar estos impactos. Es así que tras las experiencias de trabajos realizados con morteros y hormigones con CP que llevan adiciones y/o sustituciones de árido por partículas de caucho, hay algunos trabajos de investigación donde se trabaja con morteros y hormigones con base CAA. Las experiencias son muy similares a sus

precedentes con CP, ya que se trabajan los morteros y hormigones con diferentes tamaños de partículas y polvos provenientes de NFU, así como diferentes porcentajes de sustitución de árido por partículas de caucho.

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos (trabajabilidad, densidad, comportamiento acústico y térmico, SEM) están dentro de los rangos obtenidos por los morteros y hormigones de CP. Donde sí se muestra una variación, es en los valores que alcanzan en las resistencias a compresión, donde no logran superar a los valores alcanzados por los morteros de CP.

De igual forma se concluye que estos materiales son orientados a ser aplicados en elementos no estructurales y para mejorar las características de absorción de ruido e impacto, así como mejorar los valores de conductividad térmica. [178]–[185].

La bibliografía nos muestra los avances hechos en trabajos de investigación sobre el uso de las partículas de caucho provenientes de NFU en morteros y hormigones con base CP y CAA, pero prácticamente no se conocen experiencias usando fibras de caucho procedentes de NFU en morteros y hormigones: es nula la experiencia para el caso de los CAA y muy escasa para los de CP [14].

Esta investigación está orientada a analizar, precisamente el comportamiento de las fibras de caucho procedentes de los NFU en morteros de CP y CAA.

2.6 Valorización de residuos industriales en la construcción

Los residuos industriales han sufrido un incremento muy significativo en los últimos años, es por esta razón que se comenzó a investigar sobre su reciclaje proponiendo alternativas como la optimización de los procedimientos para producir materiales de similares características que incluyan dichos residuos. Pero en algunos casos estas soluciones no son económica y medioambientalmente viable ya que, en el

reproceso de fabricación se consume nuevamente fuentes de energía y se emiten más gases de efecto invernadero no obteniéndose materiales puros.[186],[187]

Dentro de las alternativas factibles para la gestión de estos materiales residuales surge la reutilización por incorporación en materiales de construcción para producir nuevos materiales.

Surgen así los trabajos dirigidos a aplicar los residuos reciclados de plásticos post-consumo en morteros u hormigones de matriz cementicia aligerados o fibroreforzados.[186],[187]

2.6.1 Elementos prefabricados: ladrillos, bloques, placas y tejas de microconcreto

Los elementos prefabricados son aquellos que han sido elaborados en serie mediante un proceso de producción (industrial o artesanal) de elementos o partes de una construcción en planta o fábrica y su posterior instalación o montaje en la obra. Como ejemplo tenemos:

- Bloques de tierra prensados
- Ladrillos de hormigón
- Tejas de microconcreto
- Piezas de ferrocemento, etc.

El desarrollo de estos elementos ha llevado a un gran avance en cuanto a la industrialización y a la incorporación de técnicas a la edificación convencional.

El proceso de producción y ejecución de estos materiales se llama construcción Industrializada, Prefabricada o Pre moldeada. La construcción por prefabricación se realiza en dos fases:

- Fabricación: La producción se lleva a cabo en fábricas (fijas o móviles) propiamente dichas o bien a pie de obra.

- Montaje: El montaje en obra puede realizarse con grúas o en forma manual, según las características de los elementos prefabricados.

Esta técnica, ha tenido un enorme desarrollo a nivel mundial, presentando ventajas como:

- Reducción de plazos de construcción.
- Organización similar a una fábrica.
- Mano de obra estable y especializada
- Mayor y adecuado control de calidad.
- Uso múltiple y repetitivo de encofrados o moldes.

Según el peso y las dimensiones de las piezas prefabricadas, se pueden clasificar en:

- Prefabricados ligeros

Son los pequeños elementos prefabricados o ligeros, de peso inferior a los 30 kg, destinados a ser colocados de forma manual por uno o dos operarios.

- Prefabricados Semipesados

Su peso es inferior a los 500 kg, destinados a su puesta en obra utilizando medios mecánicos simples a base de poleas, palancas, malacates y barretas.

- Prefabricados Pesados

Su peso es superior a 500 kg, requiriéndose para su puesta en obra, maquinaria pesada tales como grúas de gran porte.

Pero también podemos clasificarlo según su forma

- Bloques

Son elementos prefabricados para construcción de muros. Son auto estables sin necesitar de apoyos auxiliares para su colocación. Por ejemplo: bloques de hormigón, bloques de ladrillo hueco, etc.

- **Paneles**

Los paneles constituyen placas cuya relación entre grosor y superficie es significativa. Por ejemplo: muros de contención, antepechos, placas de fachadas, placas de yeso, placas onduladas, tejas etc.

- **Elementos Lineales**

Son piezas esbeltas, de sección transversal reducida en relación a su longitud. Por ejemplo: vigas, columnas, pilotes, etc.

2.6.1.1 Tejas de microconcreto. (TMC)

Las tejas son elementos de cobertura que presentan distintos perfiles y encajan con solapes longitudinales y transversales, a través de unos canales de ensamble. Sus formas geométricas, a modo de onda, facilitan la evacuación del agua; de hecho, éste es un criterio muy importante a tener en cuenta, independientemente del material del que estén fabricadas.

Su diseño debe permitir una óptima circulación del agua, evitando estancamientos y, por tanto, efectos secundarios. Además, las tejas poseen un alto grado de impermeabilidad, lo que resulta muy importante a la hora de discurrir el flujo, tanto de agua como de aire al interior de la estructura.

Los materiales para hacer las tejas han ido evolucionando con el tiempo (arcilla, hormigón, plástico, etc.); sin embargo, el diseño básico ha permanecido casi inalterable. Comúnmente, las tejas de materiales cerámicos son utilizadas en lugares donde existen cambios bruscos de clima. [187]–[189]

Las tejas se clasifican según su geometría en tejas mixtas (plana-curva), curvas y planas.

La morfología de las tejas de microconcreto puede ser exactamente igual a las de arcilla, la diferencia reside en el

proceso de fabricación, ya que para las primeras no es necesario recurrir a hornos; además, no se agrietan ni se deforman.

- La teja plana-curva (mixta) tiene una apariencia parecida a la curva, pero uno de sus extremos está compuesto por una parte plana.
- Las tejas curvas o árabes tienen forma acanalada. Van colocadas en doble sentido, es decir primero se cubre la superficie con ellas, situando la parte acanalada hacia arriba y luego se debe formar una segunda capa en sentido inverso, cubriendo la anterior.
- Las tejas planas poseen también un sistema de encaje, pero la diferencia con las anteriores es la ausencia de una parte curva. [187], [188].

Otra de las soluciones sostenibles dentro del campo de la construcción es la que corresponde a los llamados Ecomateriales y particularmente a las Tejas de Micro Concreto (TMC), que está siendo utilizada en muchos países, sobre todo de América Latina.

Una entidad que cuenta con el conocimiento y la experiencia en este tema es la Red Ecosur, organismo encargado de coordinar la transferencia de tecnología, brindar la capacitación necesaria a especialistas y centros de investigación y generar la relación e intercambio de información entre diversas organizaciones de América Latina y el resto del mundo. [187],[189]

La teja de microconcreto se muestra como una nueva solución para el techo, Se fabrican varios tipos de tejas (solo la forma varía): romana y canalón; además, cuenta con accesorios tales como caballete, laterales o botaguas y tapa honda para cumbre. Están fabricadas con arena, cemento y, en ocasiones, colorantes.

La TMC es un material de cubierta, cuyas cualidades térmicas, hidráulicas, acústicas, de duración y resistencia mecánica a los impactos son iguales o superan las de otros similares. [187],[189]

Tabla 2.4 Características técnicas TMC [189]

PRODUCTO	Teja de 8mm	Teja de 10mm
Unidades / m ²	12.5u	12.5u
Dimensión neta (mm)	500x250	500x250
Dimensión útil (mm)	400x200	400x200
Peso (kg) aprox. unidad	2.5	3.00
Peso (kg) aprox. m ²	31.2	37.5
Conductividad térmica	0.5 Watt/m °C	0.5 Watt/m °C
Durabilidad	Hay techos en buen estado con más de 20 años	
Resistencia: FLEXIÓN	Más de 60 kg	Más de 80 kg
Resistencia: IMPACTO aprox. con esfera de 220 g	Caída libre de una altura de 300 mm	Caída libre de una altura de 400 mm
Rendimiento cemento, aprox. / bolsa de 50 kg	80 u	64 u
Rendimiento cemento aprox. / bolsa de 42.5 kg	68 u	54 u
Producción de tejas: HOMBRE / DÍA	100 a 200	100 a 200
Pendiente mínima recomendable	30%	30%

3) Objetivos

3.1 Objetivo General

El objetivo de este estudio es la valorización de neumáticos fuera de uso a partir de su aplicación como fibras de neumático (FN) en mezclas cementantes ultraligeras estudiando sus propiedades físicas, mecánicas, acústicas y térmicas, para desarrollar aplicaciones en construcción

3.2 Objetivos específicos

- Estudiar los componentes para la fabricación de los morteros (fibras de neumáticos, áridos y conglomerantes).
- Evaluar las dosificaciones más adecuadas para las matrices, tanto de cemento portland como de activación

alcalina, su relación agua/conglomerante, tipos de arenas usadas, los tipos y porcentajes de disoluciones activadoras, y el tiempo y temperatura de curado.

- Analizar el comportamiento de los morteros fabricados con fibras de neumático, sus propiedades mecánicas, físicas y morfológicas.
- Estudiar las posibilidades de uso y aplicación de los morteros con fibras de neumático fabricadas con conglomerantes de base cemento activado alcalinamente y conglomerantes de base cemento portland, en la elaboración de tejas de microconcreto.

4) Metodología Experimental

4.1 Materiales

4.1.1 Fibra de neumático (FN)

Los neumáticos se componen de caucho sintético o natural, negro de carbono, óxido de zinc, acero, material textil y otros aditivos. En la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se muestra los materiales que forman parte de la estructura de los neumáticos utilizados en diferentes tipos de vehículos.

Las fibras de neumático (FN) fueron producidas en el raspado de la superficie del neumático en el recauchutado que es donde se genera la totalidad de las fibras y partículas.

Tabla 4.1 Estructura de los neumáticos en la UE.

Material	Turismo %	Camión /Autobús %
Caucho elastómero	48	43
Negro de carbono	22	21
Metal	15	27
Textil	5	-
Óxido de Zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	6

* Fuente: ETRA, European Tyre Recycling Association

Tabla 4.2 Estructura de los neumáticos - España

Material	NFU Turismo	NFU Camión
Caucho y otros	80%	72%
Acero	15%	27%
Textil	5%	1%

* Fuente: SIGNUS[39]

En la Tabla 4.3 vemos a composición química típica de los NFU donde resalta la presencia de carbono como material predominante.

En este estudio se utilizaron dos tipos de fibras de neumático, Fibra de camión (FC) con una longitud mayor de 30 mm y fibra de turismo (FT) con una longitud mayor de 25 mm, facilitadas para la investigación por la empresa MCE Mezclas Caucho, S.A.U



RASPADURA DE NEUMÁTICO

Figura 4.1 Material cedido por la empresa MCE.

Tabla 4.3 Composición química de los NFU

Elemento / compuesto	contenido	unidad
C	70	%
Fe	16	%
H	7	%
O	4	%
Óxido de zinc	1	%
S	1	%
N ₂	0,5	%
Ácido esteárico	0,3	%
Halógenos	0,1	%
Ligando cupríferos	200	mg/kg
Cd	10	mg/kg
Cr	90	mg/kg
Ni	80	mg/kg
Pb	50	mg/kg

*Fuente: OFEFP en [31]

4.1.2 Cemento Portland (CP)

El cemento fue utilizado en la fabricación de morteros, y para la fabricación de probetas (4x4x16 cm³), placas y tejas.

El cemento Portland usado es cemento gris tipo CEM I-52,5 R, suministrado por la empresa Lafarge Asland (España). que cumple los requisitos de la norma EN 197-1:2011 [190]. Las características químicas y pérdida al fuego se muestran en la Tabla 4.4

Tabla 4.4 Composición química del CP (% en peso), y * pérdida al fuego

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	PF
CP	20,3	4,51	4,71	64,32	1,18	1,67	0,97	0,07	0,15	2,02

4.1.3 Áridos

Para la elaboración de los morteros, se ha utilizado dos tipos de áridos: árido silíceo y árido calizo

4.1.3.1 Árido silíceo

Elaborado de una mezcla de arenas de origen silíceo, procedente de la empresa Caolines La piedra (Lliria, Valencia, España). Esta arena tiene características parecidas a la establecida en la normativa CEN EN 196-1 [191] Presenta una humedad inferior al 0,1% y su distribución granulométrica es equivalente a la especificada en la normativa, con un módulo de finura de 4,3.

4.1.3.2 Árido calizo

Árido calizo es arena machacada con una humedad media del 3%. suministrado por la empresa Soival (Buñol, Valencia). Para su uso en la fabricación de los morteros se pasó previamente por el tamiz # 4 mm y se trabajó con el material tamizado.

4.1.4 Agua

Para la preparación de morteros de CP se utilizó agua potable procedente de la red de suministro de la Universidad Politécnica de Valencia.

Para los morteros de activación alcalina se utilizó agua desionizada

4.1.5 Catalizador de Craqueo Catalítico del Petróleo (FCC)

El craqueo catalítico es un proceso industrial de la industria petroquímica, cuyo objetivo es la modificación de la estructura molecular de ciertos hidrocarburos para obtener naftas y convertirlas en combustibles.

El catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) se ha utilizado como precursor, en la elaboración del conglomerante activado alcalinamente.

El catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) utilizado fue procedente de la industria petroquímica. Ha sido suministrado por la empresa OMYA Clariana S.A. (Tarragona, España).

En la Tabla 4.5 se muestra la composición química del FCC que presenta como compuestos mayoritarios SiO_2 y Al_2O_3 en su composición, mostrando así su potencial como material silicoaluminoso. Tiene una composición similar al metacaolín que tiene buen comportamiento como precursor en las reacciones de geopolimerización. [192]–[200]

Tabla 4.5 Composición química de catalizador gastado de craqueo catalítico (% en peso), [12]*pérdida al fuego

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	PF^*	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	Cl^-
FCC	47,76	49,26	0,6	0,11	0,17	0,02	0,02	0,51	0,31	0,01	1,22	-

Presenta diámetros medios, en estado original, de unos $80\ \mu\text{m}$ y molido de unos $20\ \mu\text{m}$. Con la molienda se pierde la forma de la partícula esférica y esferoidal que existe en estado original, aunque siempre puede quedar alguna partícula original. En nuestro caso el FCC usado en este estudio fue molido la empresa, (ver Figura 4.2) y presenta una curva de distribución con dos picos diferenciados, el primero que se ubica entre los valores de $0,2\text{--}4\ \mu\text{m}$ y el segundo entre $10\text{--}70\ \mu\text{m}$.

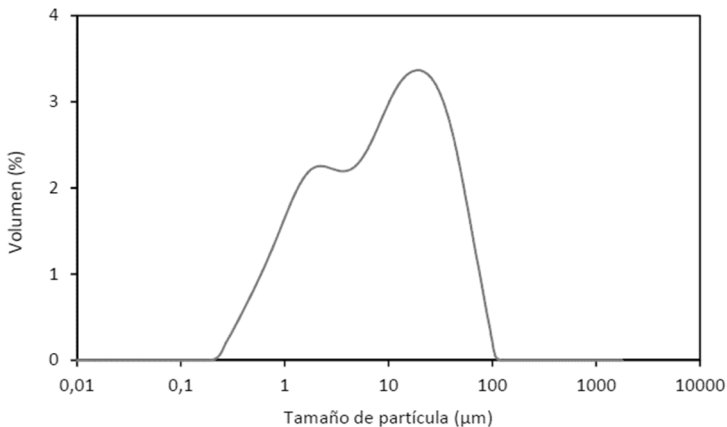


Figura 4.2 Curva de distribución granulométrica del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC)

En la Tabla 4.6 se muestra las características granulométricas de este material con un diámetro medio de partícula de 17,12 μm .

Tabla 4.6 Granulometría del catalizador usado de craqueo catalítico (FCC)

TIPO	dmedio (μm)	d(0,1) (μm)	d(0,5)(μm)	d(0,9)(μm)	Partículas < 63 μm (%)
FCC	17,12	1,10	9,61	45,12	96,42

4.1.6 Ceniza de cáscara de arroz (CCA)

La ceniza de cáscara de arroz se ha utilizado en su estado original, es decir sin molienda previa. La ceniza ha sido suministrada por la empresa Maicerías Españolas DACSA S.A. (Valencia, España), procedente de un proceso de incineración industrial.

Este material se ha utilizado como fuente de sílice para la preparación de la solución activadora (descrito en el capítulo 4.2.9) en los morteros de activación alcalina [145],[201],[202]

La composición química de la CCA utilizada se muestra en la Tabla 4.7

Tabla 4.7 Composición química de la ceniza de cáscara de arroz (% en peso), [12] *pérdida al fuego

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	PF*	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cl
CCA	85,58	0,25	0,21	1,83	0,5	0,26	3,39	6,99	-	0,67	-	0,32

La CCA presenta, como componente principal, el SiO₂ con un 85,58% [203],[204],[205]

En la Figura 4.3 se muestran la curva granulométrica correspondientes a la ceniza de cáscara de arroz en su estado original.

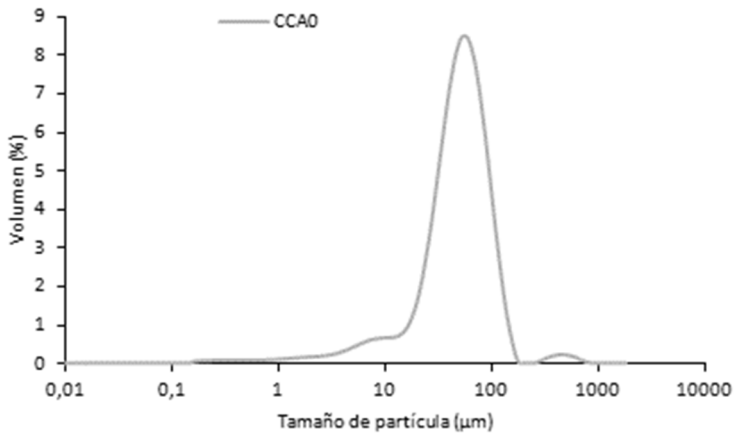


Figura 4.3 Curva de distribución granulométrica de la ceniza de cáscara de arroz (CCA)

La ceniza de cáscara de arroz original, presenta un tamaño de partícula entre el intervalo de 11 μm y 200 μm .

En la Tabla 4.8 se muestra las características granulométricas de este material con un diámetro medio de partícula de 62.24 μm . Esta característica granulométrica hace que la CCA se use como fuente de sílice para la preparación de activadores alcalinos en las reacciones de geopolimerización [12], [206]–[208]

Tabla 4.8 Parámetros granulométricos de la ceniza de cáscara de arroz (CCA)

TIPO	dmedio (μm)	d(0,1) (μm)	d(0,5)(μm)	d(0,9)(μm)
CCA	62,24	17,90	53,08	103,67

4.1.7 Escoria de alto horno (SC)

La escoria de alto horno utilizada en este estudio fue suministrada por la empresa Cementval Materiales De Construcción, S.L. Este material se utilizó como materia prima para la fabricación de morteros de activación alcalina.

En la Tabla 4.9 se muestra la composición química de la escoria de alto horno (SC), que muestra un alto porcentaje de CaO (40,15 %) y de SiO₂ (29,89 %).

Tabla 4.9 Composición química de la Escoria de alto horno SC (% en peso), [209] *pérdida al fuego

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Cl	MnO	BaO	P.F.
SC	0,87	7,43	10,55	29,89	0,26	1,93	0,57	40,15	0,50	1,29	0,44	0,39	0,18	5,53

La escoria granulada se molió antes de ser usada (proceso descrito en el apartado 4.2.7)

En la Figura 4.4 se muestran la curva granulométrica correspondientes a la escoria de alto horno tras el proceso de molienda.

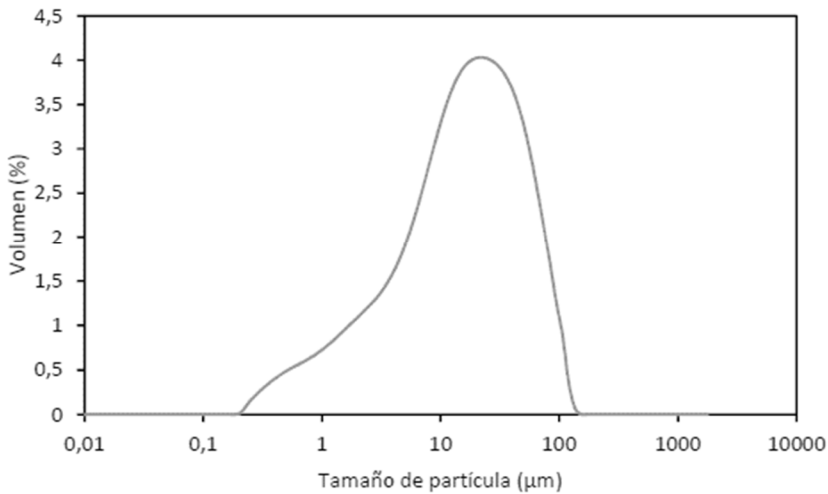


Figura 4.4 Curva de distribución granulométrica de la escoria de alto horno (SC)

La escoria de alto horno molida, presenta un tamaño de partícula entre el intervalo de 17 µm y 180 µm.

En la Tabla 4.10 se muestra las características granulométricas de este material con un diámetro medio de partícula de 26.02 μm .

Tabla 4.10 Parámetros granulométricos de la escoria de alto horno SC

Tipo	Dmed(μm)	d(0,1) μm	d(0,5) μm	d(0,9) μm
ESCORIA (SC)	26,02	1,94	17,33	63,51

4.1.8 Carbonato de sodio (Na_2CO_3)

El carbonato de sodio en forma de polvo se usó en la preparación de las soluciones alcalinas/activadoras para la posterior elaboración del conglomerante activado alcalinamente. Este material ha sido suministrado por la empresa Panreac S.A. y presenta una pureza del 99,5%.

4.1.9 Hidróxido de sodio (NaOH)

El hidróxido de sodio se usó en la preparación de las soluciones alcalinas/activadoras para luego elaborar el conglomerante activado alcalinamente. El hidróxido de sodio usado es de origen comercial que viene en una presentación en forma de perlas, cuya composición química supera el 98% de pureza.

4.1.10 Otros reactivos Químicos

Se usaron otros reactivos químicos en la ejecución de este trabajo de investigación:

- Vaselina suministrada por la empresa Panreac S. A.
- Acetona de 99,5 % de pureza suministradas por la empresa Guinama. S.L.

4.2 Equipos y procedimientos experimentales

En este apartado se muestra los equipos y procedimientos experimentales que fueron aplicados para la realización de este trabajo de investigación.

4.2.1 Toma de muestra insitu.

La toma de muestra de las FN se realizó en las instalaciones de la empresa MCE Mezclas Caucho, S.A.U, ubicado en Polígono Industrial Tres Hermanas C/ Canteros, 6 03680, Aspe (Alicante), España. Se recogieron 200 kg de material denominado “raspado de neumático” en presentaciones de bolsas de 25 kg cada uno. En total fueron 8 bolsas, de las cuales 4 bolsas provenían de neumáticos de turismo y 4 bolsas de neumáticos de camión.

4.2.2 Granulometría.

Los ensayos de granulometría se desarrollaron en los laboratorios del ICITECH. Se realizaron ensayos de granulometría para las fibras de neumático y los diferentes áridos usados en la elaboración de los morteros.

Para este ensayo se utilizó una tamizadora electromagnética marca CISA (ver Figura 4.5) y se ensayaron las muestras de acuerdo a las especificaciones establecidas en la normativa UNE - EN 196-1



Figura 4.5 Tamizador electromagnético

En el caso de los otros materiales (FCC, SC y CCA) se realizó su granulometría mediante la técnica de análisis por difracción láser (ADL). Se usó el granulómetro láser modelo Mastersizer 2000 del fabricante Malvern Instruments, para rangos de 0,02 a 2.000 micras y el programa informático Mastersizer 2000 (ver Figura 4.6). El equipo está diseñado para emitir un frente de luz láser monocromática sobre las partículas, asumiendo que son de forma esférica. Realiza una estimación de los tamaños mediante los parámetros $D(0,1)$, $D(0,5)$ y $D(0,9)$, los que representan el percentil pasante de un determinado tamaño de partícula de la muestra.

En las determinaciones granulométricas, se usó adicionalmente ultrasonidos para dispersar las partículas en el medio acuoso. El disolvente usado en las experiencias fue agua desionizada.

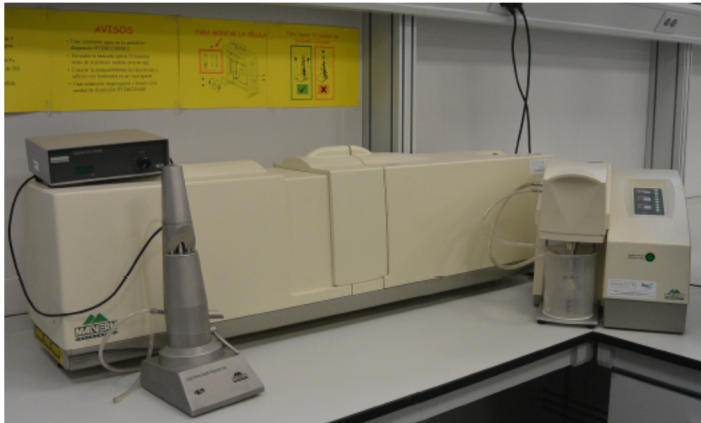


Figura 4.6 Equipo para granulometría láser.

4.2.2.1 Granulometría de las fibras de neumático

El material usado fue adquirido en forma de raspadura de neumático, que estaba compuesto por fibras de diferentes tamaños y partículas en forma de polvo de neumático.



Figura 4.7 Fibra de neumático usada en la fabricación de los morteros. (a) Fibra de turismo FT (25 mm) - (b) fibra de camión FC (30mm)

Para su uso en los morteros, previamente se separa las fibras de neumático, (FC y FT) de las partículas. Para ello se toma una muestra de 150 g y por vibración se separan las fibras en un

tiempo de 5 minutos a una potencia de vibrado de amplitud de 3 mm (amplitud varia de 1 a 5 mm) usando la malla # 0,63 mm en el tamizador.

En la Tabla 4.11 se observa los porcentajes retenidos en forma de fibras luego de ser tamizadas. Se muestra que existe mayor cantidad de fibras retenidas provenientes de los neumáticos de turismo con un 76,78% de retención.

Tabla 4.11 Porcentaje retenido sobre la malla 0,63

Neumático	Retenido sobre # 0,63	pasa
Camión	64,81%	35,14%
Turismo	76,78%	23,18%

La granulometría de las FN se confrontó a partir de tamices según la serie de luces de malla de la norma UNE - EN 196-1

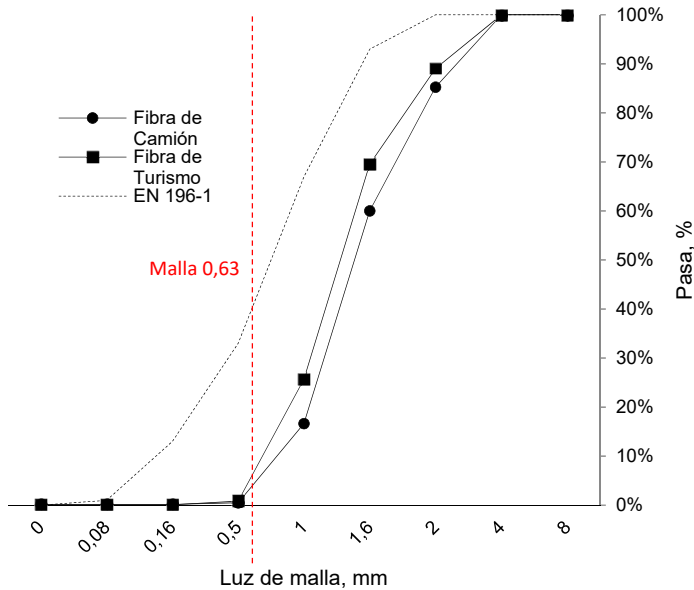


Figura 4.8 Granulometría de las fibras de neumático

4.2.2.2 Granulometría de los áridos

La granulometría ha sido analizada mediante tamizado según la serie de luces de malla de la normativa EN 196-1.[191]

Primero se analizó la granulometría de la arena de referencia CEN. Posteriormente se utilizó una mezcla de áridos de carácter silíceo, constituida por una fracción gruesa, media y fina. Cada una de las partes (gruesa, media y fina) se analizaron para determinar su granulometría y así obtener una mezcla que se aproxime a la muestra normalizada CEN y cumpla los requisitos descritos en la norma UNE 196 -1 (arena)

Tabla 4.12 Distribución granulométrica de la arena de referencia CEN (Comité Europeo Normalizado)

Dimensiones malla cuadrada (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Residuo acumulado sobre tamices %	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1

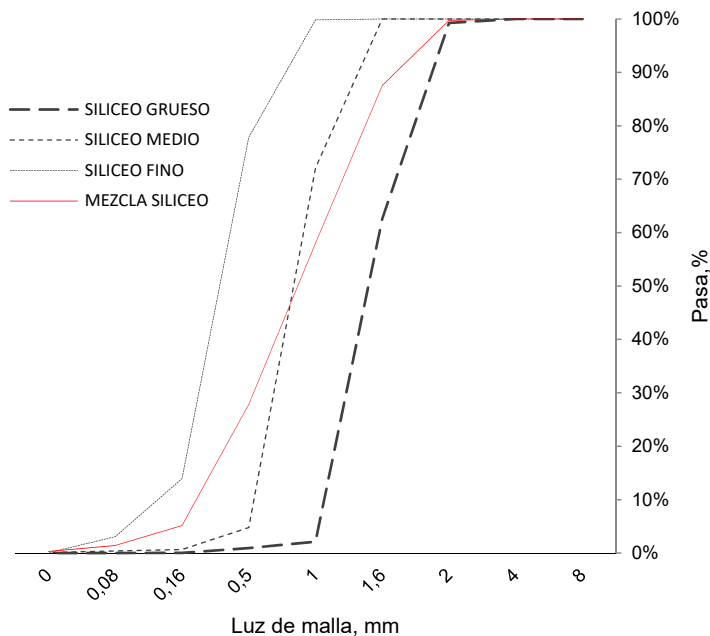


Figura 4.9 Granulometría de árido silíceo (grueso, medio ,fino) - Mezcla

En el caso del árido calizo, se utilizó arena machacada que fue directamente usada luego de pasar por el tamiz # 4.

En la Figura 4.10 se muestra las granulometrías finales de los áridos usados en esta investigación mostrando que en el caso del árido calizo existe una mayor presencia de material grueso.

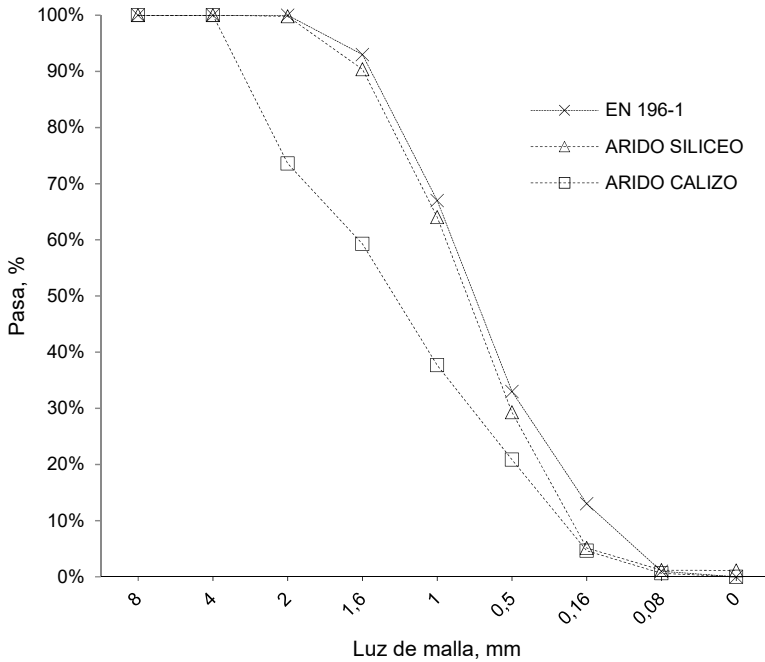


Figura 4.10 Granulometría de los áridos silíceo, calizo y referencia CEN

4.2.3 Determinación de la densidad

Para realizar la sustitución del árido en volumen por FN es preciso conocer la densidad de ambos materiales.

4.2.3.1 Densidad de los áridos.

La densidad de partículas es la relación entre la masa y el volumen. La masa se determina pesando la muestra de ensayo

en condiciones saturadas y pesándola de nuevo tras su secado en estufa a 110°C. El volumen se determina a partir de la masa de agua desplazada por pesadas según el método del picnómetro (principio de Arquímedes).

Para determinar la densidad de los árido (silíceo y calizo) se realizó mediante el método del matraz para las partículas comprendidas entre 0,063 mm y 4 mm – UNE –EN 1097-6. [191]

Se pesa 1 Kg de arena y se lava la muestra sobre el tamiz 0.063 mm para eliminar las partículas más finas y se rechaza el retenido en el de 4 mm. Se sumerge en agua dentro del matraz y se coloca al baño María manteniéndose por 24 horas a 22 °C. A continuación, se enrasa el matraz y se pesa (M2). Se vacía el matraz en una bandeja metálica. Se pesa el matraz lleno de agua enrasado (M3). Se evapora el agua de la bandeja con el árido hasta conseguir la arena superficialmente seca (sss). Para ello se toma el molde tronco cónico, se llena de muestra y se compacta con el pisón 25 veces. Se eleva el molde y si se desmorona se considera sss. Se pesa toda la muestra sss, (M1). Se seca la muestra a 110 °C hasta peso constante y se pesa (M4).



Figura 4.11 Elementos usados en el ensayo.

$$\text{Densidad aparente de partículas} \quad \rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

$$\text{Densidad de partículas tras secado en estufa} \quad \rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

$$\text{Densidad de partículas saturadas con la superficie seca} \quad \rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

En la Tabla 4.13 se muestran los resultados obtenidos para los dos tipos de áridos usados en la investigación.

Tabla 4.13 Densidades de los áridos

Árido (g)	Silíceo (g)	Calizo (g)
M1	1261,4	1101,5
M2	2028,2	1920,3
M3	1262,6	1242,2
M4	1258,8	1098,9
g/cm ³		
$\rho_a =$	2,55	2,61
$\rho_{rd} =$	2,54	2,60
$\rho_{ssd} =$	2,54	2,60

4.2.3.2 Densidad de la fibra de neumático

En el caso de las fibras de neumático se determina la densidad por diferencia de volumen desplazado una probeta graduada, utilizando un líquido de menor densidad que el agua (en este caso se usó acetona, con una densidad de 0.78 g/cm³), ya que la densidad de la FN es muy cercana a la del agua. Se realizan cuatro mediciones por cada tipo de fibra (FC–FT), obteniendo las siguientes densidades: FC de 1.25 ± 0.02 g/cm³ y FT de 1.25 ± 0.02 g/cm³. Estos resultados no se alejan de otros valores recogidos en la bibliografía, [15], [16], [49], [65] [107]–[111], [210]–[216]



Figura 4.12 probeta graduada para ensayo de densidad

Tabla 4.14 Determinación de la densidad de las FN, por diferencia de volumen.

TIPO	Masa inicial g	Volumen desplazado cm ³	g/cm ³
FC	2,50	2,00	1,25
FT	2,50	2,00	1,25

Con los valores obtenidos de las densidades se procedió a realizar los cálculos para la sustitución de árido por FN.

Tabla 4.15 valores de densidades

	g/cm ³	Relación
Densidad árido SILÍCEO	2,54	2,031
Densidad FN	1,25	
Densidad árido CALIZO	2,60	2,076
Densidad FN	1,25	

Tabla 4.16 valores de sustitución en volumen.

Árido Calizo			Árido Silíceo	
PORCENTAJE DE SUSTITUCION (%)				
0	15	25	15	25
1350	Árido (g)			
	1147,5	1012,5	1147,5	1012,5
	Fibra de neumático (FN) (g)			
	97,53	162,55	99,70	166,16

4.2.4 Molienda.

En los procesos de activación alcalina, el tamaño de partícula del material usado como precursor es muy importante, ya que puede influir en la reactividad y en sus respuestas reológicas. [193], [217]–[224]

En el caso de la escoria de alto horno, el material a usar se encontraba de forma granulada y era necesario realizar una molienda para alcanzar el tamaño óptimo.

Para realizar la molienda, antes se debe de secar la muestra por un tiempo de 24 horas en estufa a una temperatura de 60°C.



Figura 4.13 Estufa

4.2.4.1 Molino de bolas.

El molino de bolas se ha utilizado para la molienda de la escoria de alto horno. Se realizó este proceso introduciendo 500 g. de escoria en la jarra de porcelana de 1 litro de capacidad junto con 60 bolas de alúmina de 18 mm de diámetro y por un tiempo de molienda de 30 minutos para posteriormente realizar la recogida del material pasando por un tamiz # 1 mm y separar el material molido de las bolas de alúmina.

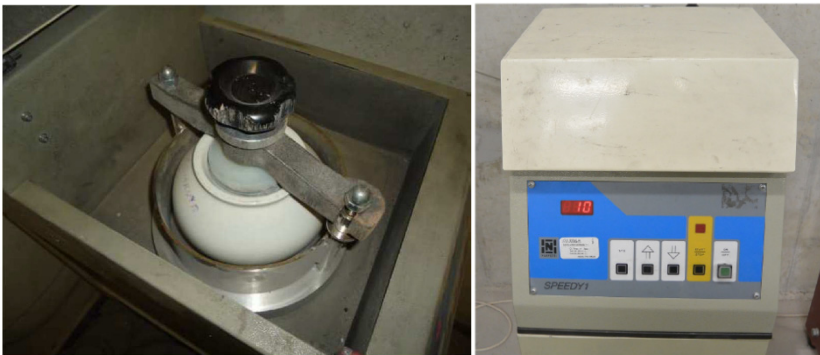


Figura 4.14 Molino de bolas modelo Speedy 1 – Empresa Nannetti

4.2.5 Peso específico – densidad

Se determinó la densidad real del CP y de los materiales usados como precursor (FCC y SC) en los morteros de activación alcalina.

La norma a emplear fue la UNE -80103 [225]– determinación de la densidad real.

La determinación de la densidad se debe de realizar sobre una muestra secada durante 2 horas a (105 ± 2) °C según la norma UNE 80220 [226]

El procedimiento del ensayo consiste en llenar el volumenómetro de Le Chatelier (ver Figura 4.15) con el líquido para el ensayo (en nuestro caso se usó acetona) hasta una altura del cuello comprendida entre las marcas 0 y 1 cm^3 . Inmediatamente de echar el líquido se secó la superficie interior del frasco por encima del nivel del líquido. Se anota la primera lectura después de haber sumergido el frasco en el baño termostático de agua a temperatura constante y evitando variaciones de temperatura superiores a $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ entre la lectura inicial y la final.

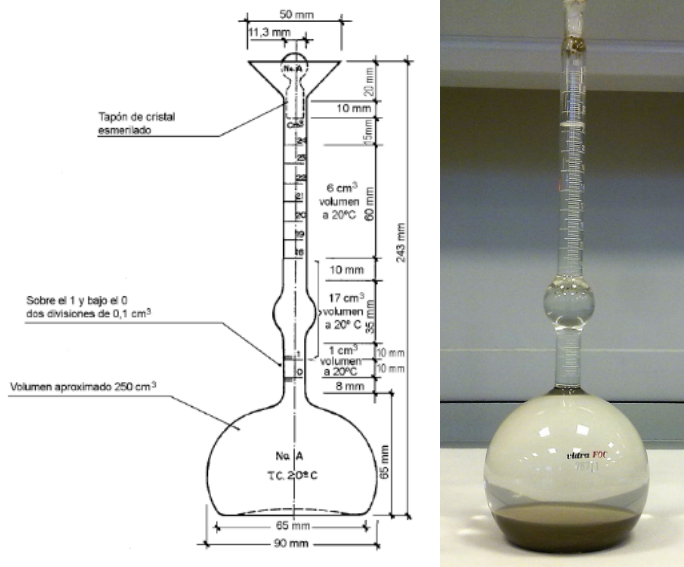


Figura 4.15 Volumenómetro de Le Chatelier

Se introduce dentro del matraz el material a analizar, pesado con un error de $\pm 0,05\text{ g}$ (en el caso del CP alrededor de 64 g). Se puede usar vibración para acelerar la introducción del cemento en el frasco y para evitar que se adhiera en la parte superior del volumenómetro.

Después de que todo el material haya sido introducido se colocará el tapón en el frasco y se hará rodar el frasco manteniendo una posición inclinada; también podrá girarse

suavemente en un círculo horizontal a fin de liberar el material de aire hasta que no surjan más burbujas de aire a la superficie.

Se tomará la lectura final después de que el frasco haya sido sumergido nuevamente en el baño termostático y una vez que se haya alcanzado el equilibrio de temperatura.

Para obtener la densidad del material en g/cm^3 se usa la siguiente fórmula:

$$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)} = m / v$$

donde:

m es la masa del material (desechado) en gramos.

v es el volumen desplazado en cm^3

Luego de realizar el ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.17 valores alcanzados de los materiales usados como precursor

Densidad CP (g/cm^3)				
Vf cm^3	21,50	21,40	21,40	21,50
Vi cm^3	0,30	0,10	0,00	0,20
Peso de CP (g)	64,00	64,00	64,00	64,00
Densidad	3,02	3,00	2,99	3,00
				3,00
Densidad FCC (g/cm^3)				
Vf cm^3	22,50	23,00	22,90	22,40
Vi cm^3	0,10	0,00	0,20	0,20
Peso de FCC (g)	55,00	55,00	55,00	55,00
Densidad	2,46	2,39	2,42	2,48
				2,44
Densidad SC (g/cm^3)				
Vf cm^3	21,10	21,10	21,30	21,20
Vi cm^3	0,10	0,30	0,20	0,20
Peso de SC (g)	55,00	55,00	55,00	55,00
Densidad	2,62	2,64	2,61	2,62
				2,62

4.2.6 Preparación de la disolución activadora

En el desarrollo de esta tesis se trabajó con morteros de CP y cementos activados alcalinamente. Los morteros geopoliméricos están compuestos por áridos (silíceo o calizo) que fueron sustituidos total o parcialmente por FN según corresponda la dosificación. Adicionalmente, los morteros de activación alcalina se preparan por la mezcla de un precursor de naturaleza silicoaluminosa (FCC, SC) (material precursor) y de una disolución activadora o activador alcalino que se trata de una disolución fuertemente alcalina. Este activador puede ser hidróxido sódico (NaOH), carbonato sódico (Na₂CO₃), silicato sódico (Na₂SiO₃), sulfato sódico (Na₂SO₄), o mezclas de ellos o también otros activadores en base potasio [209], [227]

El activador alcalino cumple un rol importante en el proceso de geopolimerización, ya que pueden obtenerse conglomerantes con altas propiedades mecánicas y de durabilidad en función de la naturaleza y de la concentración del activador. La función principal del activador alcalino es dotar un ambiente de elevada alcalinidad facilitando el proceso de disolución de la fuente de aluminosilicato [228],[229]

De acuerdo al material usado como precursor, se utilizaron diferentes activadores alcalinos.

Teniendo en cuenta que las investigaciones realizadas tienen como objetivo la producción de prefabricados de bajo coste económico y medioambiental, se ha optado en primer lugar por obtener el silicato sódico por reacción del hidróxido sódico con CCA para el caso del precursor FCC y de Na₂CO₃ para el caso del precursor SC.

4.2.6.1 Activador usado con FCC.

Para la fabricación del activador alcalino, se usó una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH), que reaccionó con la ceniza de cáscara de arroz (CCA) (fuente de sílice) y agua mediante una reacción química en un recipiente termostatzado, para generar

el silicato sódico necesario para producir la reacción de geopolimerización. [12], [13], [204], [230],[231].

La metodología usada en la fabricación de este activador es producto de investigaciones anteriores que buscaron métodos de optimizar la fabricación de esta disolución. [199], [232]

El proceso de fabricación de la disolución es como sigue. Se utiliza un reactor termostatzado (termo doméstico) de 1 litro de volumen, para evitar la pérdida de temperatura de la reacción primero se agrega el NaOH sólido y a continuación la CCA, dejando en último lugar la adición del H₂O. El llenado se hace con sumo cuidado, ya que al adicionar el agua y tapan el termo se genera una gran presión dentro del mismo, por lo que es necesario abrir el termo un par de veces para despresurizar el sistema y que no se produzca su rotura de forma brusca.[12], [13].

La temperatura en las primeras horas alcanza hasta los 85°C debido al calor liberado en la hidratación del NaOH, posteriormente se eleva hasta los 90°C, debido al calor liberado en la reacción del NaOH con la sílice presente en la CCA para formar silicato sódico, descendiendo hasta unos 45 °C a las 24 de mezclar los reactivos.



Figura 4.16 Recipiente termostatzado de uso doméstico

4.2.6.2 Activador usado con el precursor escoria de alto horno (SC)

La solución activadora alcalina utilizada en el precursor SC, fue preparada con carbonato sódico Na_2CO_3 y agua desionizada. La mezcla se agita ligeramente para que todos los componentes formen una disolución homogénea introduciendo núcleo magnético para generar una agitación continua durante unos minutos hasta que se disuelva todo el carbonato sódico en el agua desionizada. Una vez que la mezcla alcanzó la temperatura ambiente está lista para ser usada en la reacción de geopolimerización.

4.2.7 Dosificación

Las dosificaciones fijadas para los morteros en este estudio dependen del tipo de material usado como materia prima en la matriz cementante y el tipo de FN usado en la sustitución.

Las variaciones de relación agua/conglomerante dependen de la trabajabilidad útil necesaria en el mortero.

Se usaron diferentes dosificaciones de acuerdo al fin que fue usado; es así que hay una ligera variación en la relación agua/conglomerante entre los morteros usados para elaborar las probetas prismáticas y placas frente a los morteros usados en la fabricación de las tejas, que tienen una ligera disminución en su relación agua/conglomerante para obtener tejas útiles en los ensayos sometidos.

Se trabajaron 3 grupos de morteros que fueron usados en las siguientes formas.

- Probetas prismáticas (4 x 4 x 16 cm³)
- Placas (15 x 15 x 2 cm³)
- Tejas curvas.

4.2.7.1 Probetas prismáticas

Se prepararon probetas 4x4x16 cm³ de acuerdo a la norma EN 196-1[191]

4.2.7.1.1 Morteros de cemento portland para probetas de 4x4x16 cm³

Las relaciones fijadas para los morteros fabricados con CP y árido silíceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC) o fibra de turismo (FT), son las siguientes:

- Relación, agua/cemento de 0.5 en peso (para los morteros con árido y con 100% FN)
- Relación, árido/cemento de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra en volumen.

En la Tabla 4.18, Tabla 4.19, Tabla 4.20 y Tabla 4.21 se presenta los diferentes morteros y sus respectivas dosificaciones.

Tabla 4.18 Dosificación de morteros con CP, árido SIL, CAL y FC, FT

CP - 4X4X16						
TIPO	CEMI	52.5R	AGUA (0,5) g	FN g	ARIDO g	
C-S0	CTRL	SIL		0,0	1350,0	
C-C0	CTRL	CAL				
C-SC15	FC - SIL	15%		99,7	1147,5	
C-ST15	FT - SIL	15%				
C-SC25	FC - SIL	25%	450	225,0	166,2	1012,5
C-ST25	FT - SIL	25%				
C-CC15	FC - CAL	15%		97,5	1147,5	
C-CT15	FT - CAL	15%				
C-CC25	FC - CAL	25%		162,5	1012,5	
C-CT25	FT - CAL	25%				

Tabla 4.19 Dosificación de los morteros de CP con 100% FC

CODIGO	TIPO	CEM I	52.5R g	AGUA (0,5)	FC
C2	CP 2/1 FC	675,0		337,50	
C1,8	CP 1,8/1 FC	607,5		303,75	
C1,6	CP 1,6/1 FC	540,0		270,00	281,25
C1,4	CP 1,4/1 FC	472,5		236,25	
C1,2	CP 1,2/1 FC	405,0		202,50	
C1	CP 1/1 FC	337,5		168,75	

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con CP y una sustitución de 15% de CP por FCC, que contienen árido silíceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC) o fibra de turismo (FT), son las siguientes:

- Relación, agua/cemento de 0.5 en peso (para los morteros con árido y con 100% FN)
- Relación, árido/cemento de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra en volumen.
- Sustitución de 15% de CP por FCC en peso.

Tabla 4.20 Dosificación de morteros con CP - FCC, árido SIL, CAL y FN (FC, FT)

CP - 15% FCC - 4X4X16						
TIPO	CEM I	52.5R	FCC	AGUA (0,5)	FN	ARIDO
		450				
CF-S0	CTRL SIL				0	1350
CF-C0	CTRL CAL					
CF-SC15	FC - SIL 15%				99,70	1147,5
CF-ST15	FT - SIL 15%					
CF-SC25	FC - SIL 25%	382,5	67,5	225	166,16	1012,5
CF-ST25	FT - SIL 25%					
CF-CC15	FC - CAL15%				97,53	1147,5
CF-CT15	FT - CAL 15%					
CF-CC25	FC - CAL 25%				162,55	1012,5
CF-CT25	FT - CAL 25%					

Tabla 4.21 Dosificación de morteros de CP –FCC con 100% FC

CODIGO	TIPO	TOTAL g	CP g	FCC g	AGUA (0,5) g	FC g
CF 2	CP FCC 2/1 FC	675,00	573,75	101,25	337,50	
CF 1,8	CP FCC 1,8/1 FC	607,50	516,38	91,13	303,75	
CF 1,6	CP FCC 1,6/1 FC	540,00	459,00	81,00	270,00	
CF 1,4	CP FCC 1,4/1 FC	472,50	401,63	70,88	236,25	281,25
CF 1,2	CP FCC 1,2/1 FC	405,00	344,25	60,75	202,50	
CF 1	CP FCC 1/1 FC	337,50	286,88	50,63	168,75	

4.2.7.1.2 Morteros de activación alcalina usando como precursor FCC para probetas de 4x4x16 cm³

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con FCC y árido silíceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC), son las siguientes:

- Relación, agua/precursor de 0.6 en peso (para los morteros con árido y con 100% FC)
- Relación, árido/precursor de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra en volumen.

En la Tabla 4.22,

Tabla 4.23, Tabla 4.24 y Tabla 4.25 se presentan los diferentes morteros y sus respectivas dosificaciones.

Tabla 4.22 Dosificación de morteros de FCC, árido SIL, CAL y FC

FCC-CCA - 4X4X16					
CODIGO	TIPO	FCC g	AGUA (0,6) g	FC g	ARIDO g
FC-S0	FCC CTRL SIL			0	1350
FC-C0	FCC CTRL CAL				
FC-SC15	FCC - SIL 15%	450	270	99,70	1147,50
FC-SC25	FCC - SIL 25%			166,16	1012,50
FC-CC15	FCC - CAL15%			97,53	1147,50
FC-CC25	FCC - CAL 25%			162,55	1012,50

Tabla 4.23 Dosificación de morteros de FCC –CCA con 100% FC

CODIGO	TIPO	FCC g	AGUA (0,6) g	FC g
FC 2	FCC 2/1 FC	675,00	405,00	
FC 1,8	FCC 1,8/1 FC	607,50	364,50	
FC 1,6	FCC 1,6/1 FC	540,00	324,00	
FC 1,4	FCC 1,4/1 FC	472,50	283,50	345,80
FC 1,2	FCC 1,2/1 FC	405,00	243,00	
FC 1	FCC 1/1 FC	337,50	202,50	

Los morteros geopoliméricos están constituidos por áridos según corresponda, y un conglomerante que está compuesto de una materia prima o precursor silicoaluminoso (FCC) más un activador alcalino, elaborado por una mezcla de agua, hidróxido de sodio (NaOH) y ceniza de cáscara de arroz (CCA)

Tabla 4.24 Dosificación de la disolución activadora para morteros con árido

PRECURSOR (g) FCC	450,00
AGUA (g)	270,00
NaOH (g)	81,00
CCA (g)	78,75

Tabla 4.25 Dosificación de la disolución activadora para morteros 100% FC

Relación	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
PRECURSOR (g) FCC	675,00	607,50	540,00	472,50	405,00	337,50
AGUA (g)	405,00	364,50	324,00	283,50	243,00	202,50
NaOH (g)	121,50	109,35	97,20	85,05	72,90	60,75
CCA (g)	118,13	106,31	94,50	82,69	70,88	59,06

4.2.7.1.3 Morteros de activación alcalina usando como precursor SC para probetas de 4x4x16 cm³

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con SC y árido silíceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC), son las siguientes:

- Relación, agua/precursor de 0.4 en peso (para los morteros con árido y con 100% FC)
- Relación, árido/precursor de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra en volumen.

En la Tabla 4.26, Tabla 4.27, Tabla 4.28 y Tabla 4.29 se presenta los diferentes morteros y sus respectivas dosificaciones.

Tabla 4.26 Dosificación de morteros de SC, árido SIL, CAL y FC

SC - 4x4x16					
CODIGO	TIPO	SC g	AGUA (0,4) g	FC g	ARIDO g
SC-S0	SC CTRL SIL			0	1350
SC-C0	SC CTRL CAL				
SC-SC15	SC - SIL 15%	450	180	99,70	1147,5
SC-SC25	SC - SIL 25%			166,16	1012,5
SC-CC15	SC - CAL15%			97,53	1147,5
SC-CC25	SC - CAL 25%			162,55	1012,5

Tabla 4.27 Dosificación de morteros de SC con 100% FC

CODIGO	TIPO	SC g	AGUA (0,4) g	FC g
SC 2	SC 2/1 FC	675,00	270,00	
SC 1,8	SC 1,8/1 FC	607,50	243,00	
SC 1,6	SC 1,6/1 FC	540,00	216,00	
SC 1,4	SC 1,4/1 FC	472,50	189,00	322,04
SC 1,2	SC 1,2/1 FC	405,00	162,00	
SC 1	SC 1/1 FC	337,50	135,00	

Los morteros geopoliméricos están constituidos por áridos según corresponda, y un conglomerante que está compuesto de una materia prima o precursor silicoaluminoso (SC) más un activador alcalino, elaborado por una mezcla de agua y carbonato sódico (Na_2CO_3)

Tabla 4.28 Dosificación - disolución activadora SC para morteros con árido

PRECURSOR (g) SC	450,00
AGUA (g)	180,00
Na_2CO_3 (g)	38,16

Tabla 4.29 Dosificación - disolución activadora SC para morteros 100% FC

Relación	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0
PRECURSOR (g) SC	675,00	607,50	540,00	472,50	405,00	337,50
AGUA (g)	270,00	243,00	216,00	189,00	162,00	135,00
Na_2CO_3 (g)	57,24	51,52	45,79	40,07	34,34	28,62

4.2.7.2 Placas

Se confeccionan placas de $15 \times 15 \times 2 \text{ cm}^3$ las que se usaron para los ensayos de termografía. (ver Figura 4.28)

4.2.7.2.1 Morteros de cemento portland - placa

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con CP y árido silíceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC), son las siguientes:

- Relación, agua/cemento de 0.5 en peso (para los morteros con árido y con 100% FN)
- Relación, árido/cemento de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra de camión en volumen.

En la Tabla 4.30,

Tabla 4.31, Tabla 4.32 y Tabla 4.33 se presenta los diferentes morteros y sus respectivas dosificaciones.

Tabla 4.30 Dosificación de morteros con CP, árido SIL, CAL y FC - Placa

CP - PLACA						
TIPO		CEM I	52.5R	AGUA (0,5) g	FN g	ARIDO g
PC-S0	CTRL SIL				0	795
PC-C0	CTRL CAL					
PC-SC15	FC - SIL 15%	262,35		131,18	58,71	675,75
PC-SC25	FC - SIL 25%				97,85	596,25
PC-CC15	FC - CAL15%				57,43	675,75
PC-CC25	FC - CAL 25%				95,72	596,25

Tabla 4.31 Dosificación de los morteros de CP con 100% FC - PLACA

PLACAS DE 15 X 15 X 2 CP FN 100 % - PLACA					
CODIGO	TIPO	CEM I	52.5R g	AGUA (0,5) g	FC g
PC2	PCP 2/1 FC		394,74	197,37	
PC1,4	PCP 1,4/1 FC		276,32	138,16	164,48
PC1	PCP 1/1 FC		197,37	98,69	

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con CP y una sustitución de 15% de CP por FCC, que contienen árido silíceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC), son las siguientes:

- Relación, agua/cemento de 0.5 en peso (para los morteros con árido y con 100% FN)
- Relación, árido/cemento de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra de camión en volumen.
- Sustitución de 15% de CP por FCC en peso.

Tabla 4.32 Dosificación de morteros con CP - FCC, árido SIL, CAL y FC -Placa

CP - 15% FCC - PLACA						
TIPO	CEM I	52.5R g	FCC g	AGUA (0,5) g	FN g	ARIDO g
262,35						
PCF-S0	CTRL				0	795
PCF-C0	CTRL					
PCF-SC15	FC - SIL 15%	223	39,35	131,175	58,71	675,75
PCF-SC25	FC - SIL 25%				97,85	596,25
PCF-CC15	FC - CAL15%				57,43	675,75
PCF-CC25	FC - CAL 25%				95,72	596,25

Tabla 4.33 Dosificación de morteros de CP –FCC con 100% FC - Placa

PLACAS DE 15 X 15 X 2 CP - 15% FCC Y 100 % FC						
CODIGO	TIPO	TOTAL g	CP g	FCC g	AGUA (0,5) g	FC g
PCF 2	PCP FCC 2/1 FC	394,74	335,53	59,21	197,37	
PCF 1,4	PCP FCC 1,4/1 FC	276,32	234,87	41,45	138,16	164,48
PCF 1	PCP FCC 1/1 FC	197,37	167,76	29,61	98,69	

4.2.7.2.2 Morteros de activación alcalina usando como precursor FCC – placa

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con FCC y árido silíceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC), son las siguientes:

- Relación, agua/precursor de 0.6 en peso (para los morteros con árido y con 100% FC)
- Relación, árido/precursor de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra de camión en volumen.

En la Tabla 4.34, Tabla 4.35, Tabla 4.36 y Tabla 4.37 se presentan los diferentes morteros y sus respectivas dosificaciones.

Tabla 4.34 Dosificación de morteros de FCC, árido SIL, CAL y FC - Placa

FCC-CCA - PLACA					
CODIGO	TIPO	FCC g	AGUA (0,6) g	FC g	ARIDO g
PFC-S0	FCC CTRL SIL			0	795
PFC-C0	FCC CTRL CAL				
PFC-SC15	FCC - SIL 15%	262,35	157,41	58,71	675,75
PFC-SC25	FCC - SIL 25%			97,85	596,25
PFC-CC15	FCC - CAL15%			57,43	675,75
PFC-CC25	FCC - CAL 25%			95,72	596,25

Tabla 4.35 Dosificación de morteros de FCC –CCA con 100% FC - PLACA

CODIGO	TIPO	FCC g	AGUA (0,6) g	FC g
PFC 2	PFCC 2/1 FC	394,74	236,84	
PFC 1,4	PFCC 1,4/1 FC	276,32	165,79	202,22
PFC 1	PFCC 1/1 FC	197,37	118,42	

Los morteros geopoliméricos están constituidos por áridos según corresponda, y un conglomerante que está compuesto de un precursor silicoaluminoso (FCC) más un activador alcalino, elaborado por una mezcla de agua, hidróxido de sodio (NaOH) y ceniza de cascara de arroz (CCA)

Tabla 4.36 Dosificación de la disolución activadora para morteros con árido - Placa

PRECURSOR (g) FCC	262,35
AGUA (g)	157,41
NaOH (g)	47,22
CCA (g)	45,91

Tabla 4.37 Dosificación de la disolución activadora para morteros 100% FC - PLACA

Relación	2,0	1,4	1,0
PRECURSOR (g) FCC	394,74	276,32	197,37
AGUA (g)	236,84	165,79	118,42
NaOH (g)	71,05	49,74	35,53
CCA (g)	69,08	48,36	34,54

4.2.7.2.3 Morteros de activación alcalina usando como precursor SC - placa

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con SC y árido síliceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC), son las siguientes:

- Relación, activador/precursor de 0.4 en peso (para los morteros con árido y con 100% FC)
- Relación, árido/precursor de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra en volumen.

Utilización de residuos de Neumáticos Fuera de Uso en conglomerantes con base cemento portland y de activación alcalina para uso en prefabricados de bajo coste económico y medioambiental

En las tablas 4.38, 4.39, 4.40 y 4.41 se presenta los diferentes morteros y sus respectivas dosificaciones.

Tabla 4.38 Dosificación de morteros de SC, árido SIL, CAL y FC - Placa

SC - PLACA					
CODIGO	TIPO	SC g	AGUA (0,4) g	FC g	ARIDO g
PSC-S0	SC CTRL SIL			0	795
PSC-C0	SC CTRL CAL				
PSC-SC15	SC - SIL 15%	262,35	104,94	58,71	675,75
PSC-SC25	SC - SIL 25%			97,85	596,25
PSC-CC15	SC - CAL15%			57,43	675,75
PSC-CC25	SC - CAL 25%			95,72	596,25

Tabla 4.39 Dosificación de morteros de SC con 100% FC -PLACA

CODIGO	TIPO	SC g	AGUA (0,4) g	FC g
PSC 2	PSC 2/1 FC	394,74	157,90	
PSC 1,4	PSC 1,4/1 FC	275,80	110,32	188,33
PSC 1	PSC 1/1 FC	197,00	78,80	

Los morteros geopoliméricos están constituidos por áridos según corresponda, y un conglomerante que está compuesto de un precursor silicoaluminoso (SC) más un activador alcalino, elaborado por una mezcla de agua y carbonato sódico (Na_2CO_3)

Tabla 4.40 Dosificación - disolución activadora SC para morteros con árido - Placa

PRECURSOR (g) SC	450,00
AGUA (g)	180,00
Na ₂ CO ₃ (g)	38,16

Tabla 4.41 Dosificación - disolución activadora SC para morteros 100% FC - Placa

Relación	2,0	1,4	1,0
PRECURSOR (g) SC	394,74	275,80	197,00
AGUA (g)	157,90	110,32	78,80
Na ₂ CO ₃ (g)	33,47	23,43	16,74

4.2.7.3 Tejas de microconcreto

Se elaboraron tejas de microconcreto curvas de 50x25x10 mm³ las que se han caracterizado sus propiedades físicas y mecánicas.[233]

4.2.7.3.1 Morteros de cemento portland – teja

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con CP y árido silíceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC), usadas en la elaboración de las tejas son las siguientes:

- Relación, agua/cemento de 0.4 en peso (árido silíceo) y (100% FC).
- Relación, agua/cemento de 0.45 en peso (árido calizo)
- Relación, árido/ masa cementante de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra de camión en volumen.

En la Tabla 4.42,

Tabla 4.43, Tabla 4.44 y Tabla 4.45 se presenta los diferentes morteros y sus respectivas dosificaciones.

Utilización de residuos de Neumáticos Fuera de Uso en conglomerantes con base cemento portland y de activación alcalina para uso en prefabricados de bajo coste económico y medioambiental

Tabla 4.42 Dosificación de morteros con CP, árido SIL, CAL y FC - teja

CP - TEJA						
CODIGO	TIPO	CEM I	52.5R	AGUA (0,4)	FN g	ARIDO g
			g	(0,45) g		
TC-S0	CTRL SIL				0	1980,00
TC-SC15	FC - SIL 15%			348,48	146,22	1683,00
TC-SC25	FC - SIL 25%				243,71	1485,00
TC-C0	CTRL CAL	871,2			0	1980,00
TC-CC15	FC - CAL15%			392,04	143,04	1683,00
TC-CC25	FC - CAL 25%				238,40	1485,00

Tabla 4.43 Dosificación de los morteros de CP con 100% FC - TEJA

TEJA DE 500 x 250 x 10 CP FN 100 %					
CODIGO	TIPO	CEM I	52.5R g	AGUA (0,4) g	FC g
TC2	TCP 2/1 FC		1250,00	500,00	520,83

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con CP y una sustitución de 15% de CP por FCC, que contienen árido silíceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC), usadas en la elaboración de las tejas son las siguientes:

- Relación, agua/cemento de 0.4 en peso (árido silíceo) y (100% FC).
- Relación, agua/cemento de 0.45 en peso (árido calizo)
- Relación, árido/ masa cementante de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra de camión en volumen.

Sustitución de 15% de CP por FCC en peso.

Tabla 4.44 Dosificación de morteros con CP - FCC, árido SIL, CAL y FC - teja

CP - 15% FCC - TEJA							
CODIGO	TIPO	CEM I g	52.5R g	FCC g	AGUA (0,4) (0,45) g	FN g	ARIDO g
871,2							
TCF-S0	CTRL SIL					0	1980,00
TCF-SC15	FC - SIL 15%				348,48	146,22	1683,00
TCF-SC25	FC - SIL 25%	740,52		130,68		243,71	1485,00
TCF-C0	CTRL CAL					0	1980,00
TCF-CC15	FC - CAL15%				392,04	143,04	1683,00
TCF-CC25	FC - CAL 25%					238,40	1485,00

Tabla 4.45 Dosificación de morteros de CP -FCC con 100% FC - TEJA

TEJA DE 500 x 250 x 10 - CP - 15% FCC Y 100 % FC						
CODIGO	TIPO	TOTAL g	CP g	CFF g	AGUA (0,4) g	FC g
TCF 2	TCP FCC 2/1 FC	1250,00	1062,50	187,50	500,00	520,83

4.2.7.3.2 Morteros de activación alcalina usando como precursor FCC –Teja

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con FCC y árido silíceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC), usadas en la elaboración de las tejas son las siguientes:

- Relación, agua/precursor de 0.55 en peso (árido silíceo).
- Relación, agua/precursor de 0.6 en peso (árido calizo) y (100% FC).
- Relación, árido/precursor de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra de camión en volumen.

En la Tabla 4.46, Tabla 4.47, Tabla 4.48 y

Utilización de residuos de Neumáticos Fuera de Uso en conglomerantes con base cemento portland y de activación alcalina para uso en prefabricados de bajo coste económico y medioambiental

Tabla 4.49 se presentan los diferentes morteros y sus respectivas dosificaciones.

Tabla 4.46 Dosificación de morteros de FCC, árido SIL, CAL y FC - teja

FCC-CCA - TEJA					
CODIGO	TIPO	FCC g	AGUA (0,55) (0,6) g	FC	ARIDO g
TFC-S0	FCC CTRL SIL			0	1782,00
TFC-SC15	FCC - SIL 15%		431,24	131,60	1514,70
TFC-SC25	FCC - SIL 25%	784,08		219,33	1336,50
TFC-C0	FCC CTRL CAL			0	1782,00
TFC-CC15	FCC - CAL15%		470,45	128,74	1514,70
TFC-CC25	FCC - CAL 25%			214,56	1336,50

Tabla 4.47 Dosificación de morteros de FCC –CCA con 100% FC - TEJA

TEJA DE 500 x 250 x 10 - FCC -CCA - 100 % FC				
CODIGO	TIPO	FCC g	AGUA (0,6) g	FC g
TFC 2	TFCC 2/1 FC	1100,00	660,00	563,52

Los morteros geopoliméricos están constituidos por áridos según corresponda, y un conglomerante que está compuesto de un precursor silicoaluminoso (FCC) más un activador alcalino, elaborado por una mezcla de agua, hidróxido de sodio (NaOH) y ceniza de cascara de arroz (CCA)

Tabla 4.48 Dosificación de la disolución activadora para morteros con árido - TEJA

PRECURSOR (g) FCC	784,08	
	A. Silíceo	A. Calizo
AGUA (g)	431,24	470,45
NaOH (g)	129,37	141,13
CCA (g)	125,78	137,21

Tabla 4.49 Dosificación de la disolución activadora para morteros 100% FC - TEJA

Relación	2,0
PRECURSOR (g) FCC	1100,00
AGUA (g)	660,00
NaOH (g)	198,00
CCA (g)	192,50

4.2.7.3.3 Morteros de activación alcalina usando como precursor SC - teja

Las relaciones fijadas para los morteros hechos con SC y árido síliceo (SIL) o calizo (CAL) y fibra de camión (FC), usadas en la elaboración de las tejas son las siguientes:

- Relación, agua/precursor de 0.38 en peso para tejas con árido.
- Relación, agua/precursor de 0.4 en peso para tejas con 100% FC
- Relación, árido/precursor de 3 en peso.
- Sustitución de árido por fibra en volumen.

En la Tabla 4.50,

SC - TEJA					
CODIGO	TIPO	SC g	AGUA (0,38) g	FC g	ARIDO g
TSC-S0	SC CTRL SIL			0	1980
TSC-C0	SC CTRL CAL				
TSC-SC15	SC - SIL 15%	871,2	331,06	146,22	1683,00
TSC-SC25	SC - SIL 25%			243,71	1485,00
TSC-CC15	SC - CAL15%			143,04	1683,00
TSC-CC25	SC - CAL 25%			238,40	1485,00

Tabla 4.51, Tabla 4.52 y Tabla 4.53 se presentan los diferentes morteros y sus respectivas dosificaciones.

Tabla 4.50 Dosificación de morteros de SC, árido SIL, CAL y FC - teja

SC - TEJA					
CODIGO	TIPO	SC g	AGUA (0,38) g	FC g	ARIDO g
TSC-S0	SC CTRL SIL			0	1980
TSC-C0	SC CTRL CAL				
TSC-SC15	SC - SIL 15%	871,2	331,06	146,22	1683,00
TSC-SC25	SC - SIL 25%			243,71	1485,00
TSC-CC15	SC - CAL15%			143,04	1683,00
TSC-CC25	SC - CAL 25%			238,40	1485,00

Tabla 4.51 Dosificación de morteros de SC con 100% FC - TEJA

TEJA DE 500 x 250 x 10 - SC - 100 % FC				
CODIGO	TIPO	SC g	AGUA (0,4) g	FC g
PSC 2	PSC 2/1 FC	1140,00	456,00	543,89

Los morteros geopoliméricos están constituidos por áridos según corresponda, y un conglomerante que está compuesto de un precursor silicoaluminoso (SC) más un activador alcalino, elaborado por una mezcla de agua y carbonato sódico (Na_2CO_3)

Tabla 4.52 Dosificación - disolución activadora SC para morteros con árido - TEJA

PRECURSOR (g) SC	871,20
AGUA (g)	331,06
Na_2CO_3 (g)	70,18

Tabla 4.53 Dosificación - disolución activadora SC para morteros 100% FC - TEJA

Relación	2,0
PRECURSOR (g) SC	1140,00
AGUA (g)	456,00

<u>Na₂CO₃ (g)</u>	<u>96,67</u>
---	--------------

A continuación, se presentan un resumen de los niveles estudiados para probetas de 4X4X16 cm³, placas y tejas.

Tabla 4.54 Niveles estudiados en las probetas de 4x4x16 con los diferentes morteros

Probetas 4X4X16				
NIVELES DE TRABAJO ESTUDIADOS				
% DE SUSTITUCION	CP	CP-FCC	FCC-CCA	SC
CTRL	C-S0	CF-S0	FC-S0	SC-S0
	C-C0	CF-C0	FC-C0	SC-C0
	C-SC15	CF-SC15	FC-SC15	SC-SC15
15%	C-ST15	CF-ST15		
	C-CC15	CF-CC15	FC-CC15	SC-CC15
	C-CT15	CF-CT15		
25%	C-SC25	CF-SC25	FC-SC25	SC-SC25
	C-ST25	CF-ST25		
	C-CC25	CF-CC25	FC-CC25	SC-CC25
	C-CT25	CF-CT25		
100%	C2	CF 2	FC 2	SC 2
	C1,8	CF 1,8	FC 1,8	SC 1,8
	C1,6	CF 1,6	FC 1,6	SC 1,6
	C1,4	CF 1,4	FC 1,4	SC 1,4
	C1,2	CF 1,2	FC 1,2	SC 1,2
	C1	CF 1	FC 1	SC 1

Utilización de residuos de Neumáticos Fuera de Uso en conglomerantes con base cemento portland y de activación alcalina para uso en prefabricados de bajo coste económico y medioambiental

Tabla 4.55 Niveles estudiados en las placas con los diferentes morteros.

PLACAS				
NIVELES DE TRABAJO ESTUDIADOS				
% DE SUSTITUCION	CP	CP-FCC	FCC-CCA	SC
CTRL	PC-S0	PCF-S0	PFC-S0	PSC-S0
	PC-C0	PCF-C0	PFC-C0	PSC-C0
15%	PC-SC15	PCF-SC15	PFC-SC15	PSC-SC15
	PC-CC15	PCF-CC15	PFC-CC15	PSC-CC15
25%	PC-SC25	PCF-SC25	PFC-SC25	PSC-SC25
	PC-CC25	PCF-CC25	PFC-CC25	PSC-CC25
100%	PC2	PCF 2	PFC 2	PSC 2
	PC1,4	PCF 1,4	PFC 1,4	PSC 1,4
	PC1	PCF 1	PFC 1	PSC 1

Tabla 4.56 Niveles estudiados en las tejas con los diferentes morteros.

TEJAS				
NIVELES DE TRABAJO ESTUDIADOS				
% DE SUSTITUCION	CP	CP-FCC	FCC-CCA	SC
CTRL	TC-S0	TCF-S0	TFC-S0	TSC-S0
	TC-C0	TCF-C0	TFC-C0	TSC-C0
15%	TC-SC15	TCF-SC15	TFC-SC15	TSC-SC15
	TC-CC15	TCF-CC15	TFC-CC15	TSC-CC15
25%	TC-SC25	TCF-SC25	TFC-SC25	TSC-SC25
	TC-CC25	TCF-CC25	TFC-CC25	TSC-CC25
100%	TC2	TCF 2	TFC 2	TSC 2

4.2.8 Fabricación de probetas prismáticas (4x4x16 cm³) con morteros de CP y cemento activado alcalinamente.

Para la elaboración de morteros de CP y de activación alcalina se sigue el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 196-

1:2005, [191]. Este procedimiento tuvo ligeras variantes las cuales dependieron al tipo de precursor usado y también por el momento que se añade la FN. Estos procedimientos serán explicados en los siguientes ítems.

4.2.8.1 Equipos usados en la fabricación de los morteros.

La amasadora para la realización de los morteros cumple las exigencias de la norma EN 196-1.



Figura 4.17 Amasadora normalizada

Recipiente de acero inoxidable de una capacidad de 5 litros, con forma y dimensiones normalizadas y equipada de manera que pueda ser fijada firmemente al bastidor de la amasadora durante el amasado y que la altura del recipiente con relación a la pala y, por consiguiente, la separación entre la pala y recipiente, pueda ajustarse y mantenerse con precisión.

Una pala de acero inoxidable, de forma y medidas normalizadas por EN 196-1, accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas con movimientos de rotación sobre su propio eje, y con un movimiento planetario alrededor del eje del recipiente.

Los dos sentidos de rotación deben ser opuestos, y la relación entre las dos velocidades debe ser un número entero.

Velocidad lenta 140 ± 5 y 62 ± 5 rpm y velocidad rápida 285 ± 5 y 125 ± 5 rpm

4.2.8.1.1 Procedimientos de amasado morteros CP.

- Se añade el agua y la masa cementante dentro del recipiente de acero.
- Amasado durante 30 segundos a velocidad lenta, la masa cementante con agua.
- Se añade el árido en los próximos 30 segundos a velocidad lenta.
- Amasado a velocidad rápida durante 30 segundos.
- Se deja reposar la mezcla 90 segundos, a la vez que se remueve del fondo y de las paredes del recipiente el material adherido dentro de los primeros 30 segundos de los 90 segundos de reposo.
- Amasado a velocidad rápida durante 60 segundos.

- Para el caso de los morteros que tienen un porcentaje de sustitución de árido por FN, se vierte las fibras de neumático luego de los primeros 30 segundos de amase por un tiempo de 15 segundos a velocidad lenta.
- Para el caso de los morteros con 100 % FN, el proceso es el mismo, pero en vez de añadir el árido se añade las fibras de neumático y todo el proceso de amasado se realiza a velocidad lenta.

4.2.8.1.2 Procedimiento de amasado de morteros de FCC y morteros con SC.

- Se añade a disolución activadora dentro del recipiente de acero y se amasa durante 30 segundos a velocidad lenta
- Se añade el FCC o SC durante los siguientes 60 segundos de forma uniforme durante el tiempo.

- Amasado en conjunto durante 60 segundos a velocidad lenta.
- Se añade el árido en los próximos 30 segundos a velocidad lenta.
- Amasado a en conjunto durante 60 segundos a velocidad lenta.

- Para el caso de los morteros que tienen un porcentaje de sustitución de árido por FN, se vierte las fibras de neumático, transcurrido los primeros 30 segundos de amase por un tiempo de 30 segundos a velocidad lenta.

- Para el caso de los morteros con 100 % FN, el proceso es el mismo, pero en vez de añadir el árido se añade las fibras de neumático y todo el amase se realiza a velocidad lenta.

4.2.8.2 Equipos usados en la fabricación de probetas prismáticas (4x4x16 cm³).

Después del proceso de amasado se debe de colocar el mortero en moldes de acero de dimensiones 40x40x160 mm³. con un espesor aproximado de pared de 10mm. (Figura 4.18)



Figura 4.18 Molde de acero para las probetas prismáticas - EN 196-1

El molde debe disponer de tres compartimentos horizontales para la preparación simultánea de tres probetas prismáticas de 40x40x160 mm³.

El equipo de compactación se compone de una mesa rectangular unida rígidamente por dos brazos ligeros a un eje de rotación, que dista 800 mm del centro de la mesa. Durante el funcionamiento, la mesa es levantada por una leva que permite la caída desde una altura de 15.0 ± 0.3 mm, entre el martinete y el yunque. (Figura 4.19)

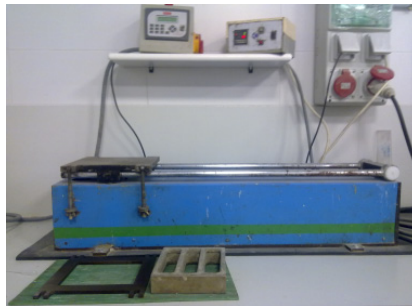


Figura 4.19 Mesa de sacudidas EN 196-1

Para los morteros de geopolímero se usó una mesa vibratoria, (Figura 4.20)



Figura 4.20 Mesa vibratoria

Dependiendo del material cementante se siguió un procedimiento diferente para el relleno y la compactación del

mortero en los moldes de acero, esto será explicado en los ítems siguientes.

4.2.8.2.1 Procedimientos de fabricación de probetas prismáticas de CP.

Una vez listo el mortero luego del amasado, se procede a colocar el mortero dentro de los moldes de acero (previamente untados con desencofrante) en dos tandas y sobre la mesa de sacudidas. Se compactará mediante 60 golpes por tanda (1 golpe por segundo). Se retira el molde de la mesa de sacudidas y se procede a enrasar la superficie del molde el material sobrante con una espátula y se cubre con un cristal para evitar evaporación de agua.

Los morteros con 100% FN son sacudidos fuera de la mesa de sacudidas y de forma manual con 10 golpes eliminando así las burbujas de aire, ya que por su consistencia más fluida si se usa la mesa de sacudidas las FN por estar entrelazadas se apiñan más en la base y menos en la superficie dejando una capa de pasta de CP en la parte superior

De esta forma el mortero está listo para iniciar su proceso de fraguado y curado en la cámara húmeda.

4.2.8.2.2 Procedimientos de fabricación de probetas prismáticas de FCC y probetas de SC.

Para los morteros de cemento activado alcalinamente una vez listo el mortero después del amasado, se procede a colocar el mortero dentro de los moldes de acero (previamente untados con vaselina) en una sola tanda y fijadas sobre la mesa de vibración. Se compactará mediante vibración por 1 minuto 30 segundos. Se retira el molde de la mesa vibratoria y se procede a enrasar la superficie del molde el material sobrante con una

espátula cubriendo luego con un film de plástico para evitar evaporación de agua y la carbonatación.

Los morteros de SC con 100% FC son sacudidos fuera de la mesa vibratoria y es compactada de forma manual con 10 golpes eliminando así las burbujas de aire, de la misma forma que para las probetas de CP

De esta forma el mortero está listo para iniciar su proceso de fraguado y curado en la cámara húmeda o en baño térmico a 65°C.

- Los morteros que se curan en baño térmico se desmoldan a las 4 h después del amasado. Seguidamente, las probetas se identifican y se envuelven en film de plástico transparente para evitar la evaporación y protegerlo frente a los agentes externos. Finalmente regresan al baño térmico a concluir su tiempo programado de curado.
- En el caso de aquellos morteros curados en cámara húmeda, debido a que el proceso de endurecimiento y fraguado es más lento, se desmoldan a las 24h para luego ser identificadas y rotuladas. Las probetas de geopolímero se envuelven en film de plástico transparente y regresan a la cámara húmeda a concluir su tiempo programado de curado, mientras que las probetas de CP se sumergen en agua y se conservan en la cámara húmeda, para que de igual forma terminen de su curado programado

4.2.8.3 Curado

4.2.8.3.1 Baño térmico.

El baño térmico está compuesto por un depósito de 1.000 litros de agua, unas resistencias que sirven para calentar el agua a la temperatura deseada, un sensor de temperatura, un termostato y una bomba circuladora de agua. La temperatura, se regula a 65 ± 2 °C. Las probetas se introducen en el baño dentro de unos

recipientes de plástico estancos, hasta el tiempo de ensayo 1, 3 y 7 d. El baño está aislado para poder mantener el calor, además se cubre para evitar pérdida de agua por evaporación.[164]

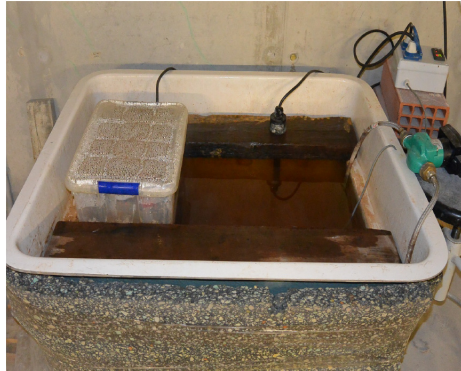


Figura 4.21 Baño térmico.

4.2.8.3.2 Cámara húmeda.

Se trata de un habitáculo que mantiene unas condiciones de temperatura de 20 °C al 95% de humedad relativa, cumpliendo con las condiciones de conservación y curado de probetas de mortero de cemento establecidas por la norma EN 196-1, temperatura $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $\geq 90\%$. Las probetas se almacenan hasta el tiempo de ensayo, de 7, 28 y 90 días.



Figura 4.22 Cámara húmeda

4.2.9 Fabricación de tejas con morteros de CP y cemento activado alcalinamente.

Las tejas usadas en esta investigación fueron diseñadas en base al documento técnico *Un techo que cubre al mundo - La Teja de Micro Concreto*, con algunas variaciones descritas en los ítems siguientes.[189]

Los morteros usados en la fabricación de las tejas tienen las mismas características (con una variación en la relación de agua/precursor) y proceso de elaboración que los morteros usados en las probetas prismáticas de 4x4x16 cm³ descritas en el ítem 4.2.8.1.

4.2.9.1 Equipos usados en la fabricación de tejas.

Luego del proceso de amasado se debe colocar el mortero sobre una maquina vibradora TEVI, construida por el Centro de Estudios de Construcción y Arquitectura Tropical. ISPAJAE. Cuba. (Figura 4.23) que consta de un chasis metálico sobre el cual va montada una placa vibradora accionada por un motor de 12 voltios.



Figura 4.23 Mesa vibradora - Tejas

El marco metálico para fabricar la teja, tiene una dimensión interior de 500 mm x 250 mm y espesor de 10 mm.

Se usaron moldes idénticos para tejas suministrados por TEVI, son livianos y resistentes fabricados con polietileno inyectado a alta presión (Figura 4.24). En la base de cada molde se le fijaron unos listones de madera a manera de marco para que pudieran apilarse y sirvieran además de cámara de curado. Constan conjuntamente de una lámina de plástico rígida que imprime la forma al mortero fresco.



Figura 4.24 Molde para tejas

4.2.9.1.1 Procedimientos de fabricación de tejas de CP y cemento activado alcalinamente.

Una vez listo el mortero después del amasado, se procede a colocar la lámina de plástico sobre la mesa vibratoria, se baja el marco metálico y se fija la mesa, se coloca el mortero y se distribuye mediante vibración (durante un 1 minuto aproximadamente) ayudado de una espátula (Figura 4.25). Una vez distribuido uniformemente el mortero en el molde metálico se abren los cierres de fijación del marco y se levanta. El mortero fresco es retirado de la mesa deslizado la lámina de plástico sobre el molde para obtener la forma final. Los moldes están diseñados de tal forma que puedan apilarse unos sobre otros conteniendo a la teja en su interior con la doble función de

facilitar su almacenamiento y crear una cámara entre ellas evitando una excesiva evaporación de agua. Con la teja colocada sobre el molde, y situados unos moldes sobre otros se cubre la última con un nuevo molde y se trasladan a la cámara húmeda, donde permanecerán durante 24 horas (Figura 4.26).



Figura 4.25 Elaboración de teja.

Después de las 24 se desmolda se limpia las rebabas de los bordes y se identifica cada muestra.

Las tejas de geopolímero se introducen en una bolsa de plástico y regresan a la cámara húmeda a concluir su tiempo programado de curado, mientras que las tejas de CP se sumergen en un depósito lleno de agua dentro de la cámara húmeda durante 7 días para luego ser sacadas del depósito y ser conservadas en la cámara húmeda de igual forma para que terminen de su curado programado.

La cámara húmeda usada para curar las tejas, es la misma descrita en el ítem 4.2.8.3.2



Figura 4.26 Curado de tejas encamara húmeda

4.2.10 Fabricación de placas con morteros de CP y cemento activado alcalinamente.

Los morteros usados en la fabricación de las placas tienen las mismas características y proceso de elaboración que los morteros usados en las probetas prismáticas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ descritas en el ítem 4.2.8.1.

4.2.10.1 Equipos usados en la fabricación de placas.

Después del proceso de amasado se debe de colocar el mortero en un molde flexible de silicona de dimensiones $150 \times 150 \times 20 \text{ mm}^3$ con un espesor aproximado de pared de 10mm. (Figura 4.27)

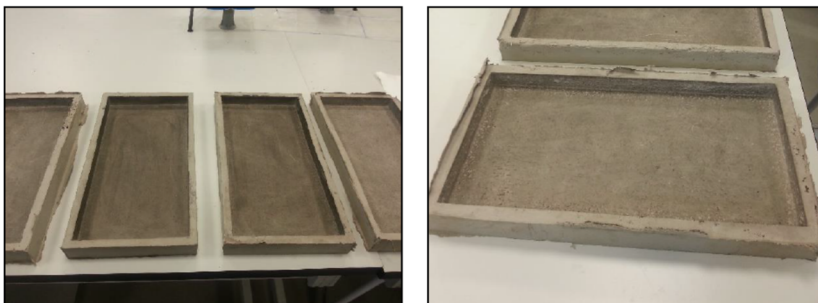


Figura 4.27 Molde de silicona para placas.

4.2.10.1.1 Procedimientos de fabricación de placas de CP y cemento activado alcalinamente.

Teniendo el mortero listo se procede a colocar el mismo dentro del molde de silicona y se distribuye uniformemente mediante vibración (durante un 1 minuto aproximadamente) sobre la mesa vibratoria (Figura 4.19). Una vez distribuida uniformemente el mortero se cubre con un film de plástico (placas de geopolímero) o con un cristal (placas de CP) para evitar evaporación la de agua.

Se desmoldan a las 24h para luego ser identificadas y rotuladas (Figura 4.28). Las placas de geopolímero se envuelven en film de plástico transparente y regresan a la cámara húmeda a concluir su tiempo programado de curado, mientras que las placas de CP se sumergen en agua y se conservan en la cámara húmeda, para que de igual forma terminen de su curado programado.

La cámara húmeda usada para curar las placas, es la misma descrita en el ítem 4.2.8.3.2

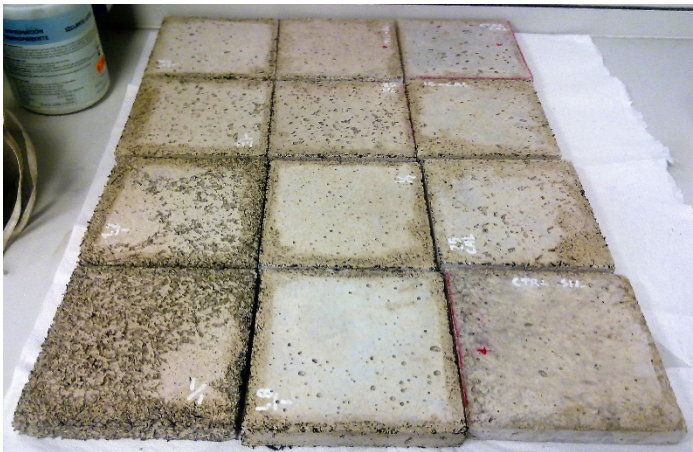


Figura 4.28 Placas de 15 x 15 x 2 cm³

4.2.11 Determinación de la trabajabilidad.

La determinación de la trabajabilidad se realiza según el procedimiento descrito en la norma EN 196-1 [191] y EN 1015-3 [234] el valor de escurrimiento se determina por el valor medio de tres lecturas en cada amasada.

La trabajabilidad es una propiedad compleja y de evaluación subjetiva, siendo resultado de la conjunción de otras propiedades del material en estado fresco tales como plasticidad, consistencia, retención y exudación de agua, masa específica, cohesión interna, adhesión y velocidad de endurecimiento. [50]

Para su determinación se emplea una mesa de sacudidas compuesta por:

- Un bastidor.
- Una placa rígida y un disco;
- Un eje horizontal y una leva de elevación.
- Un eje de elevación.

Hace falta, además, un molde troncocónico de latón de 100mm de diámetro en su base inferior y de 70 mm en la parte superior, un pisón de aproximadamente 200 mm de longitud y 40 mm de diámetro, calibre, paleta y regla para enrasar.

Se coloca el molde en el centro del disco de la mesa de sacudidas; se introduce el mortero en dos capas, cada capa se debe compactar por lo menos con diez golpes de pisón con el fin de asegurar un llenado uniforme del molde.

Se elimina el exceso de mortero, se limpia y se seca la superficie libre del disco con el fin de que esté limpia y seca. Después de aproximadamente 15 s, se levanta lenta y verticalmente el molde e imprimiéndole a la mesa 15 sacudidas con una frecuencia constante de una sacudida cada segundo, el mortero se extiende por el disco.

Se mide el diámetro del mortero en dos direcciones perpendiculares.



Figura 4.29 Mesa de sacudidas y molde de latón EN 1015-3 - Mortero antes de las sacudidas

La bibliografía nos muestra que la trabajabilidad empeora cuando se emplean agregados de caucho en morteros mientras que aumenta cuando se emplea en hormigones. Influye también el tamaño y la forma del agregado de caucho[95] [96]

Para los ensayos de trabajabilidad en morteros de CP y SC, el proceso descrito por la norma se aplicó sin problemas, mientras que, para los morteros de FCC como materia prima, por la consistencia pegajosa del mortero no se pudo realizar el ensayo con normalidad. Pero existen referencias que muestran valores para morteros similares los usados en esta tesis que alcanza valores de trabajabilidad entre 100 y 150 mm [13] [235]

4.2.12 Caracterización mecánica

4.2.12.1 Probetas prismáticas de 4 x 4 x 16 cm³

La determinación de las resistencias mecánicas de flexión y compresión se realizó de acuerdo a lo estipulado en la norma EN 196-1[191]. Por cada amasada se obtuvieron tres probetas prismáticas de 160 mm x 40 mm x 40 mm, las cuales se parten en dos mitades con el fin de obtener seis semi-primas.

Para cada edad de rotura fueron ensayadas 3 probetas obteniéndose 3 valores de resistencia a flexión y 6 valores de

resistencia a compresión, calculándose luego el promedio de dichos valores afectados por la desviación estándar.

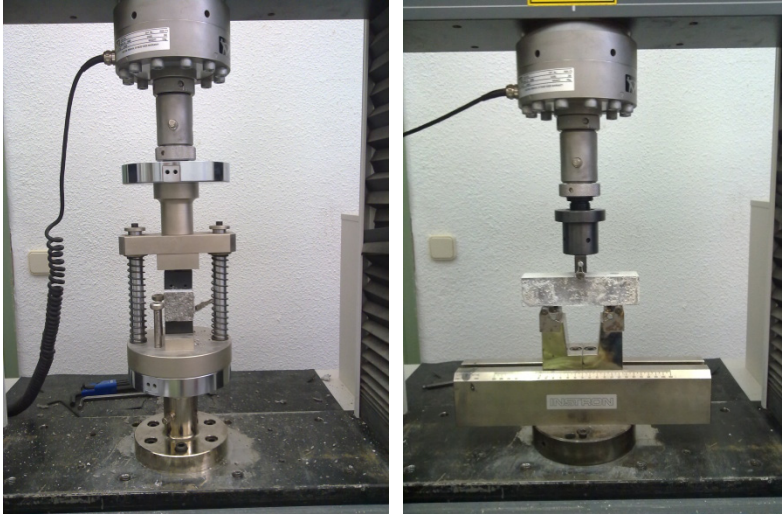


Figura 4.30 Equipo para la determinación de la resistencia a flexión por tres puntos (derecha) y compresión (izquierda) según EN 196-1.

4.2.12.2 Tejas

Para este ensayo se utilizó la norma UNE-EN 491 [233] “Tejas y piezas de hormigón para tejados y revestimiento de muros. Métodos de ensayo”. UNE-EN 490 [236]

La forma irregular de la teja hizo necesaria la fabricación de elementos adicionales para su adaptación a la máquina de ensayos. Por una parte, fueron necesarias unas piezas metálicas de sección semicircular (Figura 4.31 – derecha) que cumplieran la función de apoyo inferior, y por otra una pieza contorneada de madera, con una almohadilla de material elastómero con la misión de adaptarse al contorno de la teja y transmitir uniformemente el esfuerzo. Para su construcción se siguieron las indicaciones de la normativa adaptando su geometría a la de las tejas producidas.



Figura 4.31 Piezas y ensayo de resistencia a flexión transversal

Con los adaptadores listos sobre la máquina ubicados con una amplitud de $2/3$ de la distancia de cuelgue, se sujetó la teja y se aplicó la carga a una velocidad de 1 mm/min , alcanzando la carga de rotura dentro del rango indicado por la norma.

- Para ambos casos (probetas prismáticas y tejas), la caracterización mecánica se lleva a cabo mediante una prensa electromecánica INSTRON, la cual incorpora un sistema de captación de datos y cálculo de parámetros con la versión del programa informático Bluehill® 2.0. Las velocidades de carga se fijan en 1 mm/min para los respectivos ensayos de compresión y flexotracción a tres puntos. El fin del ensayo se programa al 60% de la máxima carga de compresión y hasta alcanzar una extensión del brazo de 1.5 mm en el caso de rotura a flexión.

4.2.13 Densidad aparente en seco y absorción de agua

Para el ensayo de densidad y absorción de agua se realizó en las probetas de 28 días de edad curadas en cámara húmeda. Se determina el peso saturado tras la inmersión en agua durante 24 horas y posteriormente para el peso en seco se introducen en estufa de secado a $60\pm 1^\circ\text{C}$ hasta obtener una masa constante, alcanzando como máximo 9 horas de secado.



Figura 4.32 Estufa de secado.

4.2.14 Velocidad de ultrasonido

Según la norma EN 12504 [237] se determinó la velocidad de propagación de impulsos de ondas longitudinales de ultrasonidos en las probetas fabricadas por morteros usados en esta tesis.

Se realizó el ensayo para todas las muestras a 28 días de edad y curadas en cámara húmeda. Para poder realizar el ensayo se debe eliminar toda presencia de humedad dentro del material, por lo que fue necesario que la muestra sea secada en estufa durante 24 horas a 60 °C de temperatura.

El principio del ensayo reside en que un palpador electroacústico mantenido en contacto con la superficie de la probeta en ensayo emite impulsos de vibraciones longitudinales. Después de atravesar en la probeta una trayectoria longitudinal conocida, el impulso de vibraciones se convierte en una señal eléctrica por un segundo palpador, mientras que circuitos electrónicos de temporización miden el tiempo de transito del impulso. Se toma la medida cuando la lectura de tiempo de transmisión se estabiliza para cada probeta. Se obtiene la velocidad de las tres

probetas de cada amasada al dividir la longitud de la probeta por el tiempo de transmisión.

El equipo usando fue: H-2000 fabricado por la empresa TICO, por transmisión directa, que consiste en un generador de impulsos eléctricos, un par de palpadores, un amplificador y un temporizador eléctrico para la medida del intervalo de tiempo transcurrido entre el comienzo de la onda del impulso generado en el palpador transmisor y el comienzo de la onda a su llegada al palpador receptor. Se proporciona una barra de calibración para facilitar un dato para la medida de velocidad.



Figura 4.33 Equipo de medición de tiempo de transmisión de ultrasonidos

4.2.15 Conductividad térmica

La conductividad térmica λ , en W/m K, o la resistencia térmica R, en m^2K/ W se refiere a la cantidad/velocidad de calor transmitida a través de un material.

La conductividad térmica se comprobó usando el equipo C-THERM TCI Este método permite estimar la conductividad térmica del material a partir de la evolución de temperatura medida por un termopar emplazado en la proximidad de un hilo resistivo. Conductividad de 0.2 a 29 W/mK y temperatura de medida de 20 a 200°C.

Para poder obtener los valores de conductividad térmica mediante el uso de este equipo se realizó usando probetas

prismáticas de 40x40x160 mm³ obteniéndose 3 lecturas por cada tipo de probeta y material ensayado. Las probetas fueron ensayadas a los 28 días de edad curadas en cámara húmeda y desecadas en estufa para eliminar toda presencia de humedad.

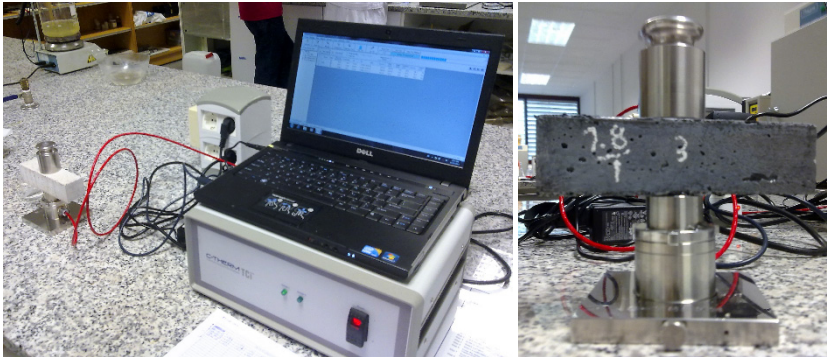


Figura 4.34 Equipo de medición de conductividad térmica (izquierda) - probeta en ensayo (derecha) según la norma UNE EN 10456:2012.

4.2.16 Caracterización Microestructural (FESEM).

La caracterización microestructural se llevó a cabo con un microscopio electrónico de barrido (MEB) o *Scanning Electron Microscope* (SEM), que nos permite realizar un examen morfológico en detalle (20X-100.000X) y análisis químico elemental de compuestos inorgánicos de muestras sólidas. Las muestras usadas deben estar secas y ser conductoras, siendo importante preservar la mayor cantidad de la estructura original de la muestra. Las muestras ensayadas pertenecen a los morteros de sustitución de árido al 25 % por FC y morteros con 100% FC, curadas a 28 días en cámara húmeda.

El Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM) modelo ULTRA 55 de la marca ZEISS, permite trabajar a muy bajos potenciales, (0.02-5 kV), en nuestras muestras se trabajó a 3 kV.

Para la visualización de las muestras en este equipo necesita de un recubierto de alto vacío, modelo EM MED020 de la marca

LEICA. Las muestras deben de colocarse en el porta muestras y hacerles un puente de plata seguido de un recubrimiento de platino con un tiempo de exposición de 30 segundos.

El FESEM de la UPV cuenta con los siguientes detectores:

- Detector de electrones secundarios SE2: ofrece la imagen SEM típica de la topografía de la superficie de la muestra con una gran profundidad de campo
- Detector de electrones secundarios *in lens*: situado en el interior de la columna de electrones, trabaja con electrones secundarios de baja energía y ofrece las imágenes de mayor resolución. Es muy sensible a las características superficiales de la muestra, por lo que es muy adecuado para la caracterización superficial de cualquier material
- Detector de electrones retro dispersados AsB: es sensible a la variación de número atómico de los elementos presentes en la muestra, por lo que se utiliza para observar los cambios en la composición química del espécimen.
- Detector de electrones retro dispersados *in lens* EsB: es independiente del detector de secundarios *in lens*, lo que le permite ofrecer señal de retro dispersados pura, sin ninguna contaminación de electrones secundarios y a muy bajo potencial de aceleración
- Detector de energía dispersiva de Rayos X, EDS (OXFORD INSTRUMENTS): recibe los Rayos X procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones. Como la energía dispersada de los Rayos X es característica de cada elemento químico, proporciona información analítica cualitativa y cuantitativa de puntos, líneas o áreas seleccionadas en la superficie de la muestra. Esta técnica se conoce como Microanálisis por EDS. Los softwares EDS usados en nuestro estudio fueron AZTEC e INCA de Oxford Instruments.

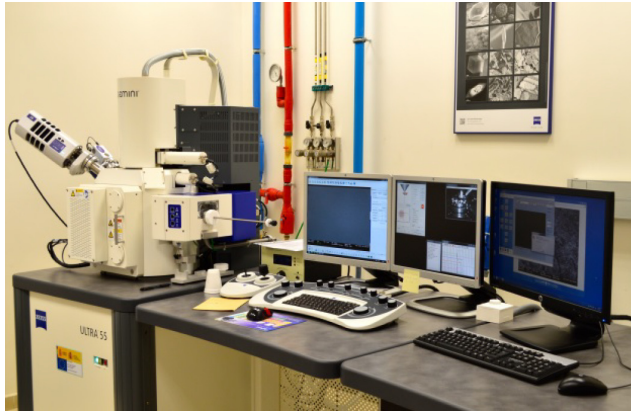


Figura 4.35 Microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM)

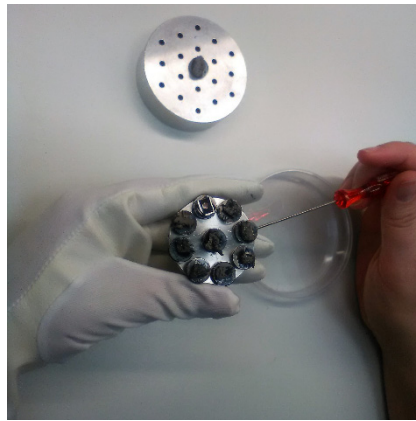


Figura 4.36 preparación de muestras para FESEM

4.2.17 Ensayos de Termografía

Todo objeto con una temperatura superior al cero absoluto ($0 \text{ Kelvin} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$) emite radiación infrarroja. El ojo humano no puede ver esta radiación ya que es ciego para esta longitud de onda. La cámara termográfica no. El corazón de la cámara, el detector infrarrojo, es sensible a la radiación infrarroja. A partir de la intensidad de la radiación infrarroja, este determina la temperatura de la superficie del objeto y la hace visible para el ojo humano mediante una imagen térmica. *Este proceso se denomina termografía.*

Para la realización de este ensayo se tuvo que diseñar una metodología experimental no normalizada, la cual consta de los siguientes equipos.

- Una cámara termográfica TESTO 870-2, que tiene una resolución de infrarrojos 160 x 120 píxeles y emisividad 0,93.
- Se fabricó una caja de tableros de madera con las dimensiones de 46x35,8x43 cm³, completamente aislada térmicamente por sus 6 caras con poli-estireno expandido de 2 cm de espesor y una fina capa de papel aluminio para evitar su deformación.



Figura 4.37 Caja aislada térmicamente - cámara termográfica

- Una Luminaria incandescente e infrarroja marca Philips HR 250 R 250W - 230-250V para generar calor.
- Luminaria halógena marca Osram de 77 W – 230V.
- Termómetro digital, marca *lab thermometer* IP65 LT -102, el cual se ubica en el interior de la caja detrás de la placa a ser ensayada.
- Cronómetro digital.

Para la realización de este ensayo se fabricaron placas de 15x15x2 cm³. Su elaboración y dosificación están descritas en los ítems 4.2.10 y 4.2.7.2

El procedimiento del ensayo es el siguiente.

- Se instala la caja en el interior de un espacio con una temperatura estable durante el ensayo de cada muestra.
- Dentro de la caja se sitúa la luminaria en la parte central posterior de la caja para que sea el punto generador de calor.
- Se coloca en la cara frontal la placa a ensayar.
- Frente a la caja se instala la cámara termográfica a la misma altura de la placa de ensayo.

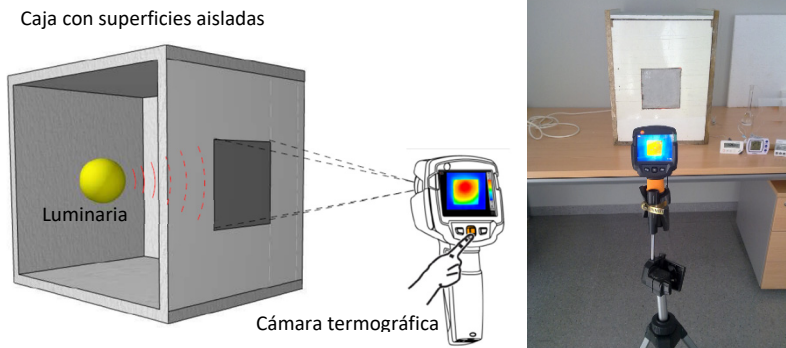


Figura 4.38 Esquema del ensayo realizado

- En el minuto cero se toma la temperatura interior con el termómetro digital y se anota el valor. Se toma una foto a la placa y simultáneamente se enciende la lámpara que irá subiendo de temperatura en el interior.
- Cada 5 minutos se irá tomando nota de la temperatura interior y paralelamente se tomará una foto a la placa con la cámara termográfica.
- Durante 30 minutos se irá repitiendo la toma de imágenes y de temperatura.
- Luego de la toma de imágenes se procederá a analizar las imágenes generadas para evaluar la evolución térmica del material.

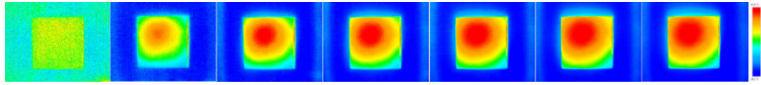


Figura 4.39 Imágenes infrarrojas tomadas cada 5 minutos

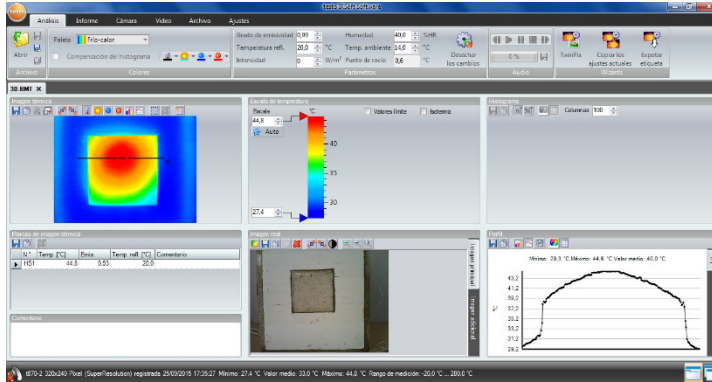


Figura 4.40 Software usado para el análisis de las imágenes infrarrojas.

- El software nos ayuda a generar curvas que muestran la temperatura del material en un área o sección determinada, es así que podemos ver la evolución de temperatura en la cara exterior de la placa.

De cada una de las imágenes térmicas infrarrojas se realiza una sección (Figura 4.41) y se obtiene una curva cuantitativa que muestra la temperatura alcanzada en cada punto de la imagen (pixel). El conjunto con las demás curvas obtenidas en las otras imágenes tomadas cada 5 minutos nos muestra el incremento de temperatura hasta llegar a la temperatura máxima alcanzada a los 30 minutos. El incremento de temperatura sólo se muestra en la parte donde está ubicada la probeta, no así en la superficie aislada de la caja donde el incremento de temperatura es mucho menor (Figura 4.42)

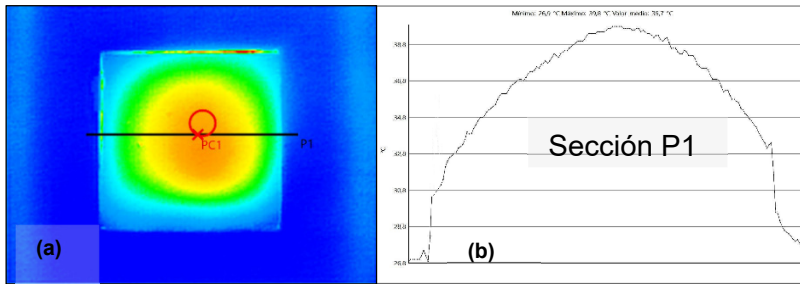


Figura 4.41 (a) imagen térmica infrarroja / (b) sección P1.

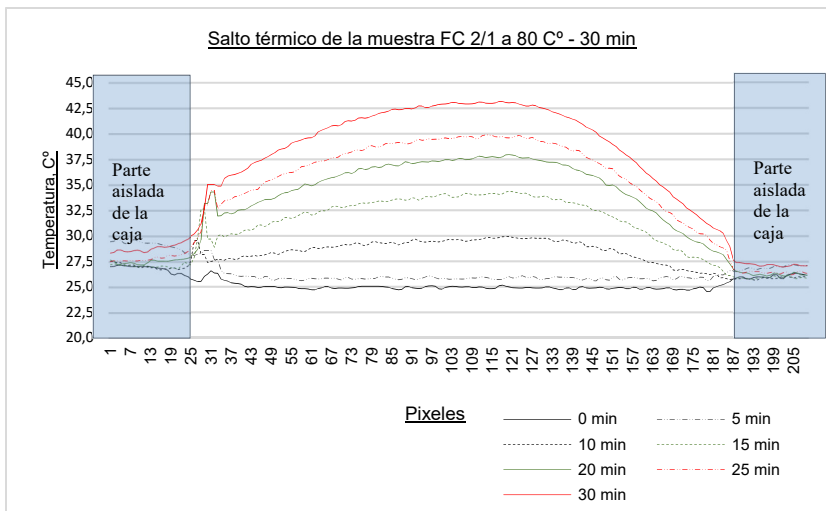


Figura 4.42 Curvas de temperatura - cada 5 minutos

4.2.18 Tejas. Ensayos de impermeabilidad al agua

Para este ensayo se utilizó la norma UNE-EN 491 [233]: “Tejas y piezas de hormigón para tejados y revestimiento de muros. Métodos de ensayo”.

El principio consiste en aplicar agua sobre las tejas para determinar su impermeabilidad al agua.

Los elementos necesarios para el ensayo son los siguientes:

- Marco estanco: sobre o alrededor de la teja o pieza de la parte cóncava.
- Masilla impermeable o sellante: para sellar herméticamente la junta entre el marco estanco y la teja o pieza de la lima hoyo (parte cóncava).
- Detector de caída de gotas de agua.

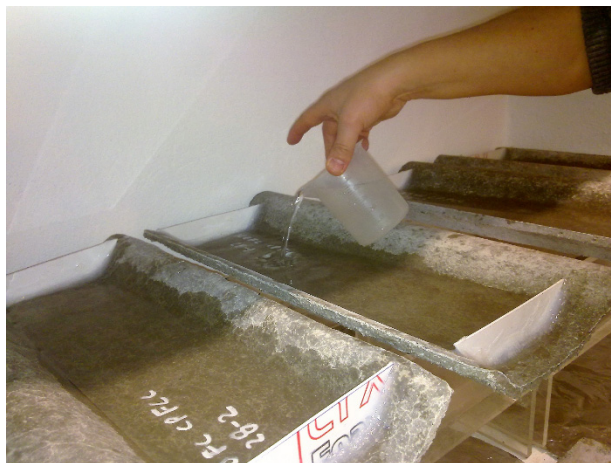


Figura 4.43 Ensayo de impermeabilidad al agua en tejas de microconcreto

Para el desarrollo del ensayo, la teja debe de colocarse en un soporte que permita mantener la teja en posición horizontal y cubrirla con agua. Se sellaron los bordes de la teja con silicona como se observa en la Figura 4.43. Una vez seco el sellante se cubrió con agua entre 10 y 15mm de altura, se ubicó un espejo en la parte inferior del soporte y se dejó transcurrir 20 horas \pm 5 minutos y tras las cuales se verifica el número de gotas de agua que atraviesan la teja y caen en el espejo.

Sobre los resultados, se anotan si caen o no gotas de agua de la parte inferior de la teja durante el periodo de tiempo transcurrido.

4.2.19 Tejas. Ensayos de resistencia al impacto

El ensayo se desarrolló en base a lo especificado en el documento técnico “Un techo que cubre al mundo: La Teja de Micro Concreto (TMC)” editado por la red ECOSUR [189]. Se realizó ligeras modificaciones a lo estipulado en la norma para su cumplimiento.

El equipo está diseñado para ensayar la resistencia de las tejas a cargas de impacto, esto nos ayuda a evaluar la calidad del mortero utilizado.

El equipo consta de una guía tubular de 450 mm de altura, diámetro interior de 41 mm, esfera metálica de 220 ± 1 gramos de peso. La carga de impacto que se aplica a las tejas de 10 mm de espesor es de 8800 g x cm (40 cm de altura).

El procedimiento es el siguiente:

- La teja a ensayar se apoyará sobre una estructura de listones de madera de 2x2x25 cm, separados a una distancia de 220 mm, procurando que la estructura y la teja queden totalmente horizontales.
- Se coloca el equipo sobre el centro de la sección plana de la teja y a la mitad de la distancia entre los listones.
- Se garantiza la verticalidad del equipo mediante el auxilio de un nivel de burbuja situado en la parte superior del equipo.
- Se deja caer la bola metálica desde la parte superior de la guía tubular.
- Las tejas ensayadas son aquellas que cumplieron los 28 días de producidas.

En este ensayo se reporta la edad de las tejas y el promedio de los impactos soportados por cada unidad de ensayo antes de fallar.

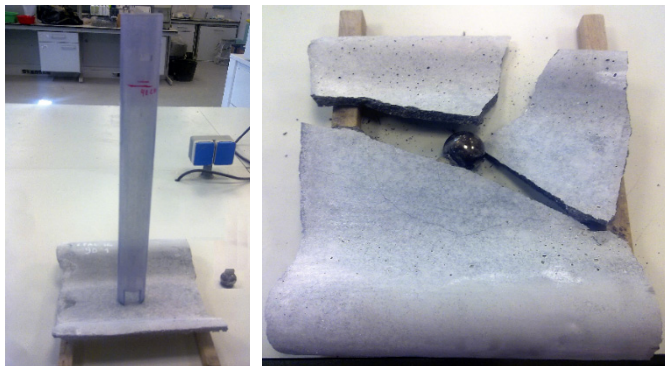


Figura 4.44 Equipo usado en ensayo de impacto – teja rota después del ensayo de impacto

5) Resultados y discusión

Se caracterizaron propiedades físicas y mecánicas de composites de matrices de morteros de cemento portland y morteros de cemento activado alcalinamente, sustituyendo árido por la FN (FC y/o FT); en ambos casos se analizaron las propiedades de trabajabilidad o escurrimiento, densidad aparente en seco (Dap) y absorción de agua (Abs %), se midieron las resistencias mecánicas (flexión y compresión), se obtuvieron imágenes por micro estructura SEM – FESEM, se midió la velocidad de ondas longitudinales de ultrasonidos, además de ensayos de conductividad térmica y termografía.

Con alguna de las mezclas se elaboraron tejas las cuales se evaluaron morfológicamente mediante medidas de peso, escuadría y espesor, además de ensayos de resistencia a flexión transversal, resistencia a impacto y ensayos de impermeabilidad.

A continuación, se presenta de forma detallada los resultados obtenidos.

5.1 Trabajabilidad – caracterización en estado fresco

La determinación de la trabajabilidad se realiza según el procedimiento descrito en la norma EN 1015-3 [234] y EN 196-1 [191].

5.1.1 Morteros de cemento portland - CP

En los ensayos de trabajabilidad realizados a los morteros de CP usando FN (FC o FT) en sustitución de árido (calizo o silíceo), observamos en la Figura 5.1 los valores de escurrimiento (E) frente al porcentaje de sustitución de árido por FN, donde se ve una disminución del escurrimiento a medida que se incrementa el porcentaje de FN.

El escurrimiento es menor para los morteros con árido calizo, lo cual es probablemente debido a la mayor absorción de agua.

El uso de FC o FT en la composición del mortero no influye de forma significativa en los valores de escurrimiento alcanzados, ya que las estructuras de las fibras son muy similares.

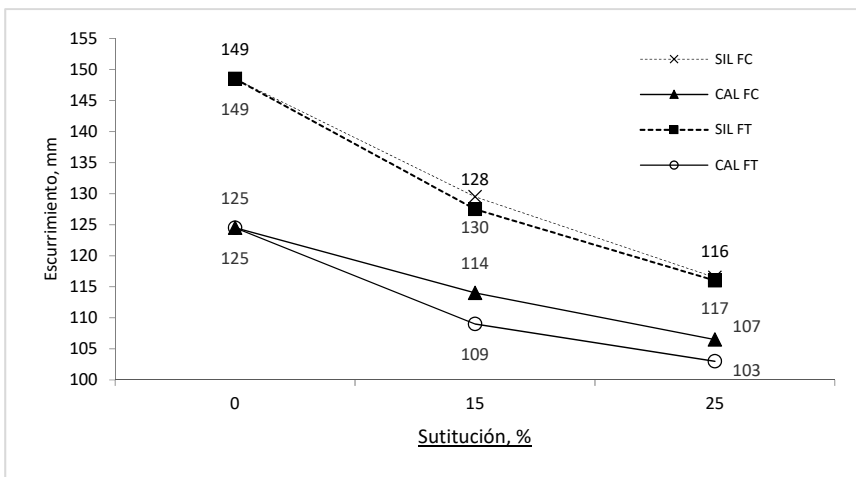


Figura 5.1 Valores de escurrimiento (E) de morteros elaborados con CP

Se realizó una sustitución parcial del 15% de CP por FCC en peso, manteniéndose las demás dosificaciones de los materiales que forman parte de la fabricación de los morteros de CP (ver apartado 4.2.7.1.1). De estos nuevos morteros podemos apreciar en la Figura 5.2, donde se representa el escurrimiento (E) frente al porcentaje de sustitución de árido por FN (FC o FT), por una parte una disminución del escurrimiento cuando aumenta el porcentaje de FN, como ya veíamos en la Figura 5.1. Por otra parte, se observa una disminución significativa del escurrimiento, cuando se sustituye parcialmente el CP por FCC (líneas rojas).

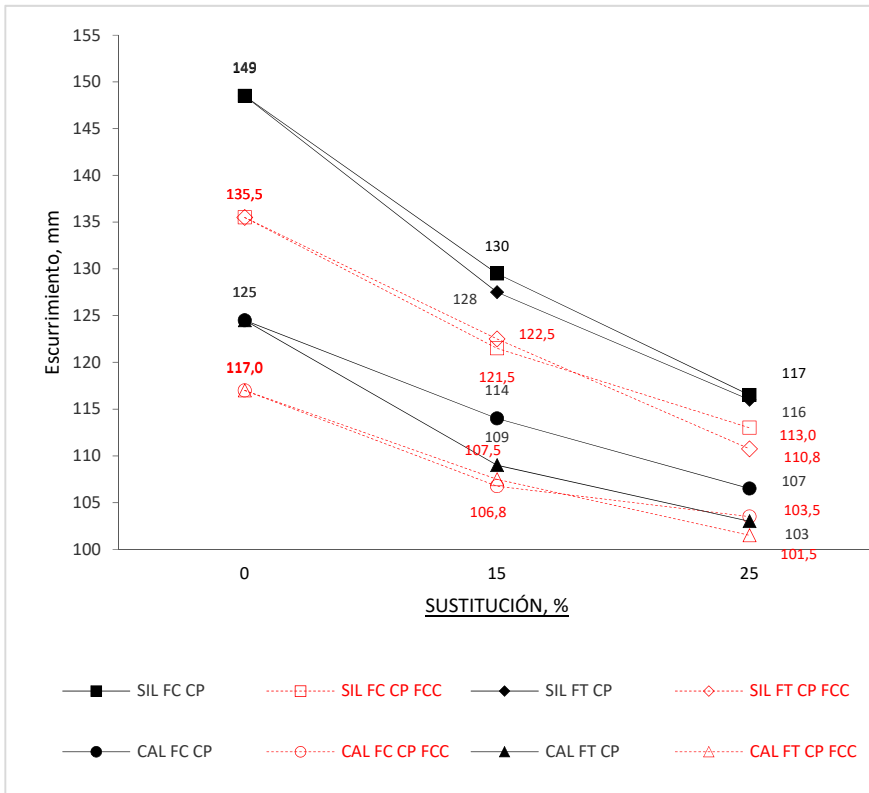


Figura 5.2 Valores de escurrimiento (E) de morteros de CP vs CP -15% FCC

Estudios previos realizados por el grupo de investigación [195], [238] ya pusieron de manifiesto una disminución significativa de la trabajabilidad conforme aumentaba el porcentaje de sustitución de CP por FCC. Este hecho es debido a la estructura zeolítica con elevada superficie específica que presenta el FCC, que facilita la absorción del agua.

5.1.2 Morteros de escoria de alto horno - SC

En la Figura 5.3 se representa el escurrimiento (E) frente al porcentaje de árido sustituido por FC para morteros de activación alcalina en los que se ha utilizado SC como precursor y una mezcla de agua y carbonato sódico (Na_2CO_3) como activador alcalino (ver apartado 4.2.7.1.3).

Los resultados ponen de manifiesto una disminución del escurrimiento conforme aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FC tanto para el árido silíceo como para el árido calizo. Al igual que para las experiencias realizadas con CP (ver Figura 5.1) se observan valores de escurrimiento inferiores cuando se utiliza árido calizo, si bien en este caso las diferencias son mucho menos significativas.

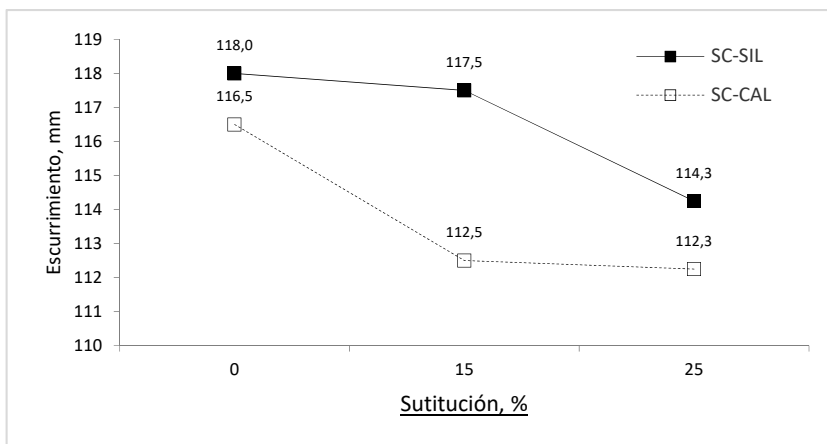


Figura 5.3 Valores de escurrimiento (E) de morteros elaborados con SC

Debemos tener en cuenta que las grandes diferencias de composición química entre los morteros de CP y los morteros de CAA, hacen que presenten comportamientos diferentes. Una de las diferencias significativas que presentan es en lo que a su comportamiento reológico se refiere, que se ve reflejado en los valores de escurrimiento obtenidos. Si comparamos la Figura 5.1 (valores correspondientes a FC) con los valores de la Figura 5.3, vemos en primer lugar como comentábamos, diferencias menos significativas entre árido calizo y árido silíceo para morteros activados alcalinamente (líneas rojas). Y en segundo lugar en general, valores de escurrimiento inferiores para los morteros activados alcalinamente; si bien hay que tener en cuenta que las relaciones agua/conglomerante son diferentes. En la Figura 5.4 vemos representados conjuntamente ambos tipos de morteros para que puedan apreciarse mejor las diferencias mencionadas

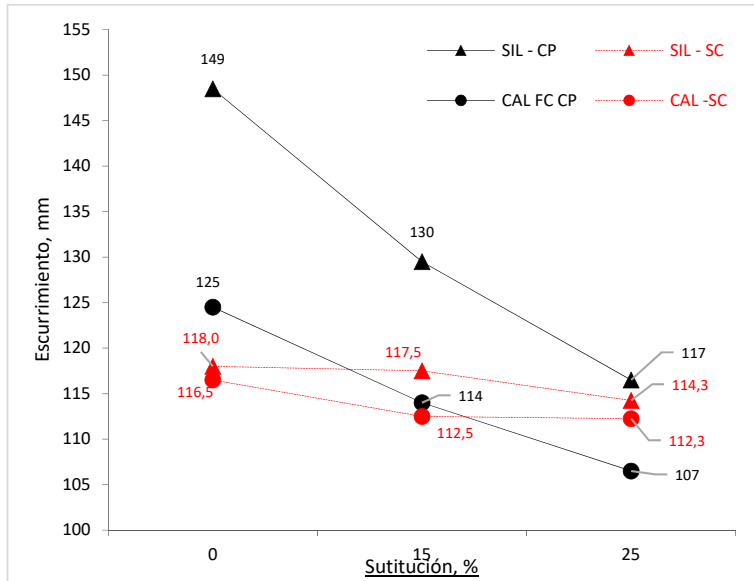


Figura 5.4 Valores de Ecurrimiento CP vs SC

Una vez concluidos las experiencias realizadas con morteros de activación alcalina utilizando SC como precursor, se realizaron experiencias utilizando FCC como precursor. La reología de los morteros obtenidos no permitió la medición del escurrimiento, ya

que estos morteros presentaban una elevada adherencia y eran muy viscosos.

Conclusiones de trabajabilidad – caracterización en estado fresco.

Tanto en los morteros de CP como en los morteros de activación alcalina se observa una disminución de la trabajabilidad conforme aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FN. Si bien esta disminución es más acusada para los morteros de CP.

El tipo de árido utilizado (silíceo o calizo) tiene influencia en la trabajabilidad, así los morteros elaborados con árido calizo presentan una trabajabilidad inferior a la de los morteros con árido silíceo. Estas diferencias fueron mucho más acusadas en los morteros de cemento portland.

La sustitución parcial del 15% de FCC por CP supone una disminución significativa de la trabajabilidad debido a la estructura zeolítica del FCC, que facilita la absorción de agua.

La complicada reología de los morteros de activación alcalina en los que se utilizó FCC como precursor no permitió la medida de la trabajabilidad, este hecho fue debido a la elevada adherencia y viscosidad de la mezcla.

5.2 Densidad aparente en seco y absorción en porcentaje

La densidad aparente en seco (D_{ap}) y la absorción (en porcentaje) (Abs) se especifican bajo las siguientes fórmulas (5.1) y (5.2) respectivamente, esto tras haber determinado la masa seca (P_d) y saturada en agua (P_s) de la probeta. Donde V_{pa} es el volumen interior de las caras de la probeta, que en nuestro caso es 256 cm^3 , y P_d es la masa seca obtenida tras desecar las probetas en estufa a $60 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ y obtener una masa constante, luego de 9 horas de secado como máximo.

$$D_{ap} = \frac{P_d}{V_{pa}} \quad (5.1)$$

$$Abs(\%) = \frac{P_s - P_d}{P_d} \times 100 \quad (5.2)$$

5.2.1 Dap y Abs de morteros de CP

En la Tabla 5.1, se analizan los valores de densidad aparente en seco de los morteros de CP y los morteros con 15% de sustitución de CP por FCC usando ambos áridos (silíceo y calizo), y los dos tipos de FN (FC y FT) (ver códigos en la Tabla 4.18 y Tabla 4.20 del apartado 4.2.7.1.1) Se aprecia claramente que la densidad aparente en seco disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del árido por FN, este comportamiento responde a que la densidad de ambos áridos es ligeramente superior al doble de la densidad de la FN (ver Tabla 4.15) [239] Al analizar el comportamiento entre los morteros de árido calizo y árido silíceo vemos que los morteros con árido calizo llegan a tener mayores valores de densidad que sus pares hechos con árido silíceo, este comportamiento se atribuye a la diferencia de densidad entre áridos, ya que el árido calizo obtiene mayor valor de densidad que el árido silíceo (ver Tabla

4.13 del apartado 4.2.3.1) obteniendo de esta forma morteros más compactos y de mayor densidad. Al observar el comportamiento entre las dos fibras (FC y FT) vemos que los valores alcanzados son muy similares y sus diferencias no son significativas entre sí, ya que las densidades de ambas fibras son iguales como ya vimos en la Tabla 4.14 en el apartado 4.2.3.2

Para los morteros que contienen 15% de FCC en sustitución de CP, la variación de densidad respecto a sus pares de sólo CP no es significativa, ya que los valores que alcanzan estos morteros con FCC son muy similares con los morteros de solo CP; casi en todos los casos al alza, excepto para el mortero control (CF-S0) de árido silíceo.

Tabla 5.1 Dap de los morteros con árido – CP – ver códigos en Tabla 4.18

<i>Dap (g/cm³)</i>							
CP				CP- 15%FCC			
Silíceo		Calizo		Silíceo		Calizo	
C-S0	2,24 ± 0,02	C-C0	2,36 ± 0,02	CF-S0	2,18 ± 0,02	CF-C0	2,37 ± 0,02
C-SC15	2,06 ± 0,02	C-CC15	2,21 ± 0,01	CF-SC15	2,10 ± 0,02	CF-CC15	2,19 ± 0,03
C-ST15	2,02 ± 0,01	C-CT15	2,17 ± 0,04	CF-ST15	2,09 ± 0,01	CF-CT15	2,18 ± 0,02
C-SC25	1,91 ± 0,03	C-CC25	2,06 ± 0,02	CF-SC25	2,01 ± 0,03	CF-CC25	2,08 ± 0,03
C-ST25	1,89 ± 0,02	C-CT25	2,04 ± 0,03	CF-ST25	1,99 ± 0,01	CF-CT25	2,07 ± 0,01

Los valores recogidos en la Tabla 5.2 analizan la densidad aparente en seco de los morteros sin árido (solo con FC) en su composición. Muestran que la densidad aparente en seco disminuye a medida que la relación de cemento portland y FC (CP/FC) disminuye, tal como se muestra en la dosificación dentro del apartado 4.2.7.1.1. en la Tabla 4.19 y Tabla 4.21. En ellas, la relación CP/FC se acerca hacia la unidad (1/1), ya que,

lo que se mantiene constante es la cantidad de FC y lo que se reduce poco a poco es el CP.

Si observamos los valores de densidad alcanzados por los morteros que tienen un 15% de sustitución de CP por FCC, se ve una ligera disminución de la densidad con respecto a sus homólogos de sólo CP; diferencias que son significativas y que podría ser debido a la diferencia de densidades entre el CP ($3,00 \text{ g/cm}^3$) y FCC ($2,44 \text{ g/cm}^3$) (ver Tabla 4.17). Pero también se puede deber a una menor compactación que se obtiene en las muestras con FCC, dada la elevada absorción de agua de este componente.

Tabla 5.2 Dap de los morteros con sin árido- CP y CP 15%FCC ver códigos en la Tabla 4.19 y Tabla 4.21)

Dap (g/cm^3)			
CP		CP- 15%FCC	
C2	1,54 \pm 0,01	CF 2	1,47 \pm 0,01
C1,8	1,50 \pm 0,01	CF 1,8	1,44 \pm 0,02
C1,6	1,47 \pm 0,01	CF 1,6	1,45 \pm 0,03
C1,4	1,42 \pm 0,02	CF 1,4	1,33 \pm 0,02
C1,2	1,42 \pm 0,01	CF 1,2	1,30 \pm 0,02
C1	1,37 \pm 0,03	CF 1	1,18 \pm 0,04

A medida que disminuye la densidad aparente en seco aumenta la capacidad de absorción de agua. En la Figura 5.5 se muestra el coeficiente de absorción frente al porcentaje de sustitución de árido por FN, donde el porcentaje de absorción de los morteros se incrementa a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FN. Es decir, a mayor presencia de FN, mayor absorción de agua, siendo los morteros de CP y con árido síliceo los que muestran mayores valores de absorción en comparación a los morteros con árido calizo.

Estos resultados están de acuerdo con investigaciones anteriores que advirtieron la presencia de mayores cantidades de aire en el hormigón con caucho, en comparación con el hormigón normal [77] [20]. Otros autores como Siddique y Naik [25],[240],[241] indican que este hecho puede ser debido a la

naturaleza no polar de caucho y su predisposición a atrapar aire en su superficie rugosa.[106],[107]

La sustitución del 15% de CP por FCC en el conglomerante disminuye los valores de absorción en casi todos los morteros, esto podría explicarse teniendo en cuenta el carácter puzolánico del FCC, que hace que los productos obtenidos en esta reacción se sitúen en los poros densificando el mortero, disminuyendo la porosidad conectada y, por tanto, reduciendo la absorción [14]

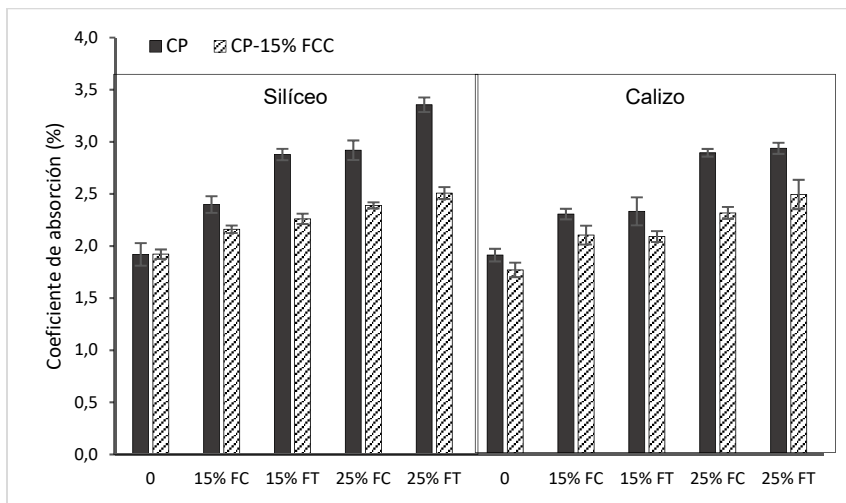


Figura 5.5 Absorción de los morteros con árido – CP y CP 15%FCC – ver codigos en Tabla 4.18 y Tabla 4.20)

En la Figura 5.6, se representa de la misma forma el coeficiente de absorción frente a las diferentes relaciones de CP/FC; el comportamiento de los morteros tiende a tener mayor grado de absorción a medida que se va reduciendo la relación CP/FC. Ello estaría de acuerdo con los valores de densidad obtenidos (ver Tabla 5.2) donde una disminución de la densidad implicaría un incremento del coeficiente de absorción

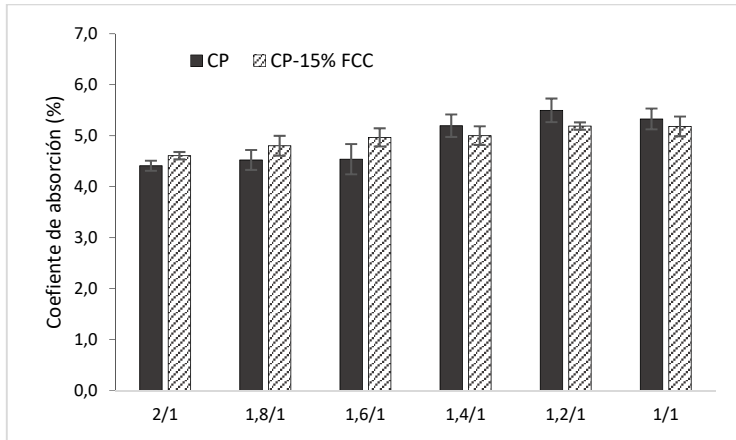


Figura 5.6 Absorción de los morteros con relación CP/FC sin árido, solo conteniendo FC y CP – CP 15%FCC

5.2.2 Dap y Abs de morteros de activación FCC - CCA

En la Tabla 5.3 se listan los valores de densidad aparente en seco de los morteros de activación alcalina usando como precursor FCC y una mezcla de CCA, NaOH y agua como activador alcalino, los dos áridos (síliceo y calizo), así como FC en diferentes porcentajes de sustitución del árido. De la misma forma que los morteros de CP, se observa que la densidad aparente en seco disminuye a medida que aumenta la sustitución del árido por FC, esto también se atribuye a la diferencia de densidades entre los áridos y la FC. Para los dos tipos de áridos usados en los morteros los valores obtenidos son muy similares entre sí. Los códigos correspondientes a las dosificaciones de la Tabla 5.3 se encuentran en la Tabla 4.22 del apartado 0

Tabla 5.3 Dap de los morteros con árido – FCC-CCA- ver códigos en la Tabla 4.22

Dap (g/cm ³)			
FCC			
	Sílice		Calizo
FC-S0	2,06 ± 0,02	FC-C0	2,07 ± 0,05
FC-SC15	1,96 ± 0,01	FC-CC15	1,97 ± 0,01
FC-SC25	1,84 ± 0,02	FC-CC25	1,87 ± 0,01

En la Tabla 5.4, se observa que para los morteros con 100% FC, por lo tanto sin árido, disminuye la densidad a medida que la relación FCC/FC se acerca a la unidad (1/1). Los códigos y las dosificaciones correspondientes se encuentran en la

Tabla 4.23 del apartado 0. En la dosificación se observa que conforme pasamos de la relación FC2 a FC1 se produce un aumento relativo del contenido en FC y por tanto una reducción de la densidad variando de 1,43 g/cm³ para FC2 a 1,26 g/cm³ para FC1

Tabla 5.4 Dap de los morteros sin árido- FCC-CCA- ver códigos en la

Tabla 4.23

Dap (g/cm ³)	
FCC	
FC 2	1,43 ± 0,01
FC 1,8	1,43 ± 0,02
FC 1,6	1,40 ± 0,02
FC 1,4	1,36 ± 0,05
FC 1,2	1,33 ± 0,01
FC 1	1,26 ± 0,04

Como ya vimos en la Figura 5.5 la capacidad de absorción de agua para los morteros con árido silíceo muestran un incremento con respecto a los valores alcanzados en los morteros con árido calizo, probablemente debido a la deficiente compactación en los morteros preparados con árido silíceo. La Figura 5.7 pone de manifiesto un incremento del coeficiente de absorción conforme aumenta el contenido de fibra lo que sugiere que se produce una peor densificación y una mayor cantidad de huecos generados por las interfaces entre la fibra y la matriz cementante.

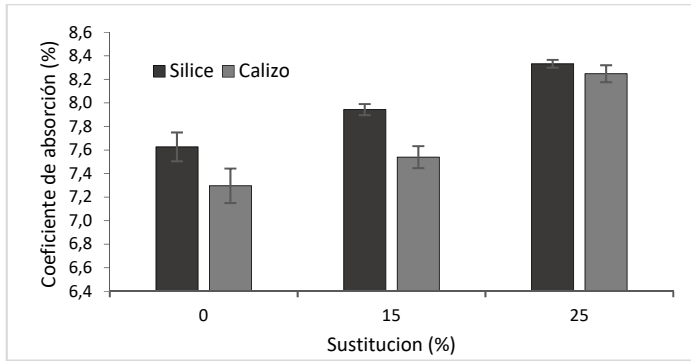


Figura 5.7 Absorción de agua - morteros de FCC con árido y FC

En la Figura 5.8 se muestra el coeficiente de absorción frente a las diferentes relaciones de FCC/FC para los morteros sin árido. Se observa un ligero aumento del coeficiente de absorción conforme disminuye el contenido del precursor FCC, y por tanto aumenta en forma relativa el contenido de fibra. Si bien las diferencias son pequeñas, podemos considerar que este incremento del coeficiente de absorción estará relacionado con una peor compactación que se produce al aumentar la cantidad de fibra, que produciría una mayor absorción de agua. Adicionalmente debemos tener en cuenta que la relación agua/precursor es elevada (0,6) lo que también produciría un incremento de la porosidad. Ambos factores serían responsables de este incremento del coeficiente de absorción.

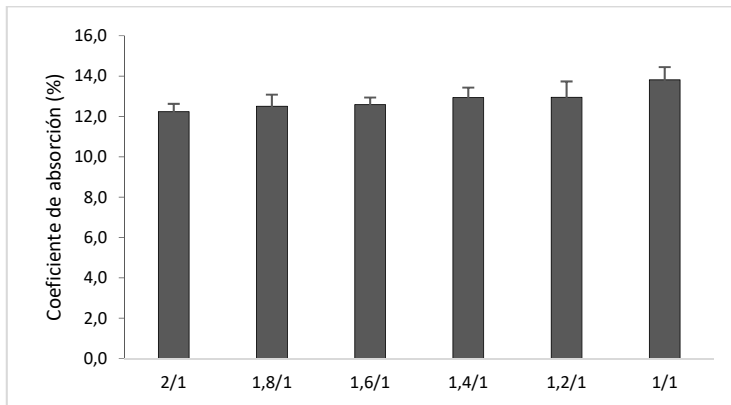


Figura 5.8 Absorción de los morteros sin árido con matrices FCC - CCA

5.2.3 Dap y Abs de morteros de SC

En las Tabla 5.5 y Tabla 5.6 se muestran los valores de densidad aparente en seco de los morteros de activación alcalina usando como precursor la SC y como activador alcalino una mezcla de Na_2CO_3 y agua, con los dos áridos (síliceo y calizo) así como FC en diferentes porcentajes de sustitución del árido. Los códigos y las dosificaciones correspondientes se encuentran en la Tabla 4.26 y Tabla 4.27 de apartado 4.2.7.1.3. en este caso, también se observa que la densidad aparente en seco disminuye a medida que aumenta la sustitución del árido por FC, esto también por la diferencia de densidades entre áridos y la FC. También se constata lo observado en experiencias anteriores, que los morteros con árido calizo presentan densidades superiores. Los resultados de la Tabla 5.6 (morteros sólo con fibra) coinciden con lo observado para los morteros FCC-CCA (Tabla 5.4), esto es una disminución de la densidad conforme disminuye la cantidad de precursor, y por tanto aumenta de forma relativa la cantidad de fibra .

Tabla 5.5 Dap de los morteros con árido – SC- ver códigos en la Tabla 4.26

Dap (g/cm ³)			
SC			
Sílice		Calizo	
SC-S0	2,27 ± 0,01	SC-C0	2,39 ± 0,03
SC-SC15	2,13 ± 0,01	SC-CC15	2,23 ± 0,02
SC-SC25	2,02 ± 0,02	SC-CC25	2,09 ± 0,02

Tabla 5.6 Dap de los morteros con sin árido con matriz – SC ver códigos en la Tabla 4.27

Dap (g/cm ³)	
SC	
SC 2	1,56 ± 0,03
SC 1,8	1,55 ± 0,02
SC 1,6	1,52 ± 0,03
SC 1,4	1,51 ± 0,01
SC 1,2	1,46 ± 0,02
SC 1	1,26 ± 0,04

En la Figura 5.9 se representa la absorción de agua frente al porcentaje de sustitución de árido por FC. Los resultados ponen de manifiesto un ligero aumento del coeficiente de absorción frente al porcentaje de sustitución de árido por FC. A diferencia de los morteros de FCC-CAA, en este caso el incremento es mucho más suave, obteniéndose también como en el caso anterior coeficientes de absorción superiores para los morteros con árido silíceo.

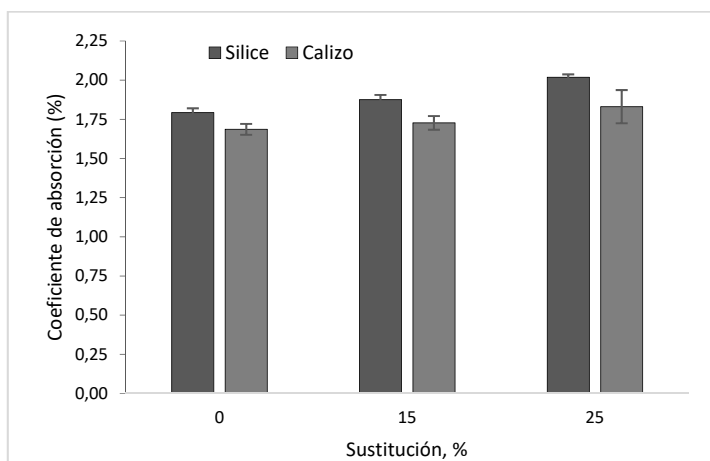


Figura 5.9 Absorción de los morteros con árido – SC

En la Figura 5.10 se observa que para los morteros sin árido la variación sigue la misma tendencia que los otros morteros de CP y FCC - CCA, incrementan a medida que la relación SC/FC disminuye.

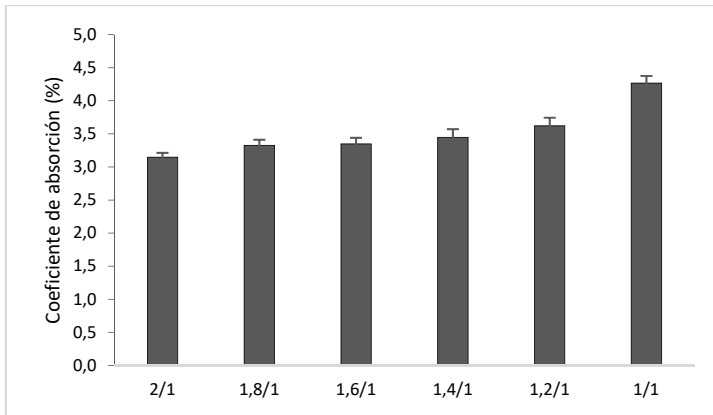


Figura 5.10 Absorción de los morteros sin árido con matriz -SC

En la Figura 5.11 y Figura 5.12, se representa conjuntamente la densidad aparente en seco frente a los porcentajes de sustitución de los morteros con diferentes matrices cementicias con base cemento portland (CP y CP 15%FCC) y con base cemento activado alcalinamente (FCC y SC) con sustituciones de árido por FC del 0, 15 y 25 % así como los morteros sin árido y 100% FC. Los resultados ponen de manifiesto que la densidad aparente en seco disminuye a medida que aumenta la sustitución de árido (silíceo o calizo) por FC, ya que su densidad es aproximadamente el doble que la de la FC, además que los morteros con árido silíceo obtiene valores menores de densidad con respecto a sus similares con árido calizo debido probablemente a la poca compactación en los morteros preparados con árido silíceo.

Al comparar el comportamiento de las diferentes matrices se constata que la matriz geopolimérica de FCC presenta valores inferiores al resto. Este hecho podría explicarse teniendo en cuenta que este tipo de materiales incorporan FCC y CCA que

presentan densidades menores al CP y además que la relación agua/precursor es de 0,6, frente al 0,4 para los morteros de SC y 0,5 para los morteros de CP.

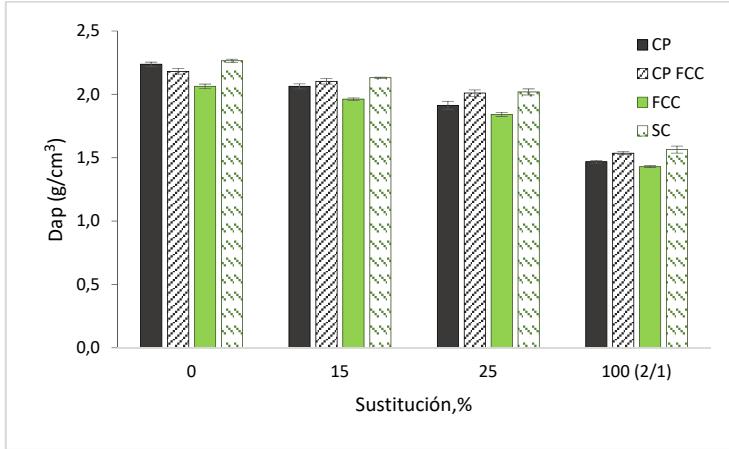


Figura 5.11 Dap de los morteros con árido silíceo con matrices cementicias de CP y CP15%FCC y de cemento activado alcalinamente con matrices de FCC y SC

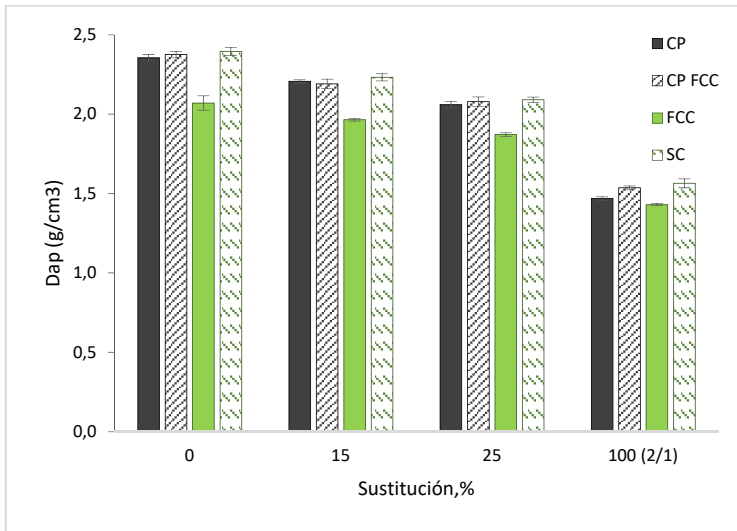


Figura 5.12 Dap de los morteros con árido calizo con matrices cementicias de CP y CP15%FCC y de cemento activado alcalinamente con matrices de FCC y SC

En la Figura 5.13 y Figura 5.14 se representa conjuntamente el coeficiente de absorción, frente a los porcentajes de sustitución de los morteros con diferentes matrices cementicias con base cemento portland (CP y CP 15%FCC) y con base cemento activado alcalinamente (FCC y SC) con sustituciones de árido por FC del 0, 15 y 25 % así como los morteros sin árido y 100% FC. Podemos observar que el porcentaje de absorción se acrecienta a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FC. En el caso de los morteros geopoliméricos elaborados con FCC como precursor, muestran una capacidad muy superior de absorción de agua probablemente debido a la mayor relación de agua/precursor (0,6) y la menor densidad del FCC y CCA.

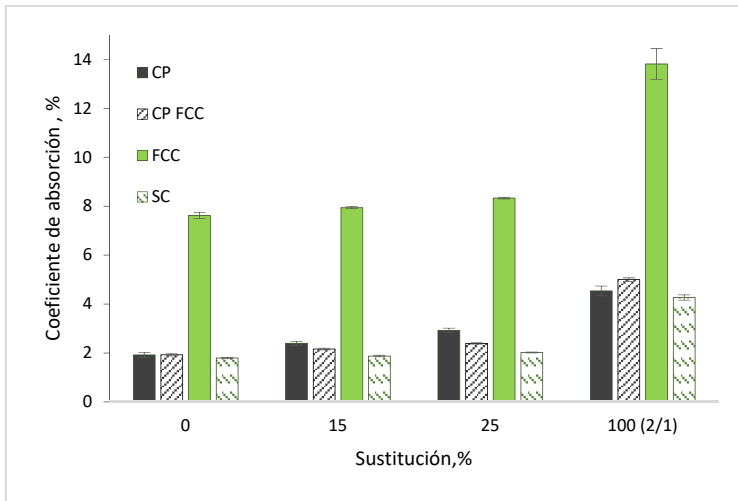


Figura 5.13 Coeficiente de absorción de los morteros con árido silíceo con matrices cementicias de CP y CP15%FCC y de cemento activado alcalinamente con matrices de FCC y SC

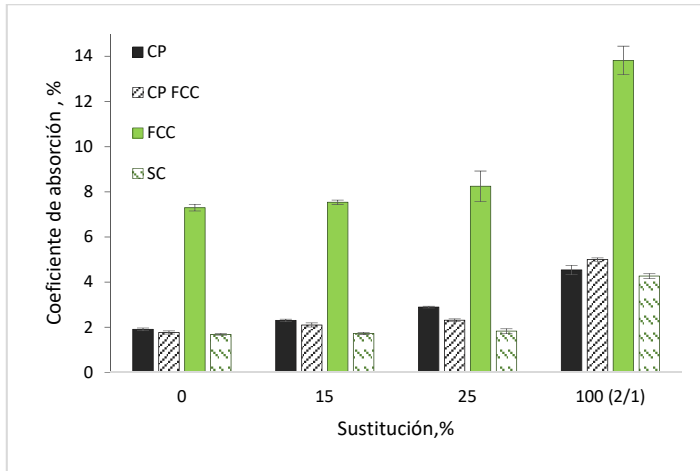


Figura 5.14 Coeficiente de absorción de los morteros con árido calizo con matrices cementicias de CP y CP15%FCC y de cemento activado alcalinamente con matrices de FCC y SC

En investigaciones previas se pone de manifiesto la presencia de poros en la estructura de la matriz cerca de la partícula de neumático, al mismo tiempo de la deficiente interfase con la partícula de caucho [50], esto corroboraría también los resultados de los coeficientes de absorción obtenidos para todas las matrices, que se incrementan al aumentar el contenido de fibra.

En la Figura 5.15 se muestran imágenes tomadas con el microscopio de morteros de CP con 25% de sustitución de árido por FC, donde podemos apreciar la presencia de poros (formas cóncavas y menos claras) que se encuentran muy próximos a la FC (zonas de color negro), además de la deficiente unión entre la FC y la matriz, ya que se evidencia una traza irregular de la matriz y sombras alrededor de la FC. Al mismo tiempo se observan múltiples grietas (b,d), no así con las partículas de áridos que reflejan una geometría más definida y regular evidenciando una unión más sólida.

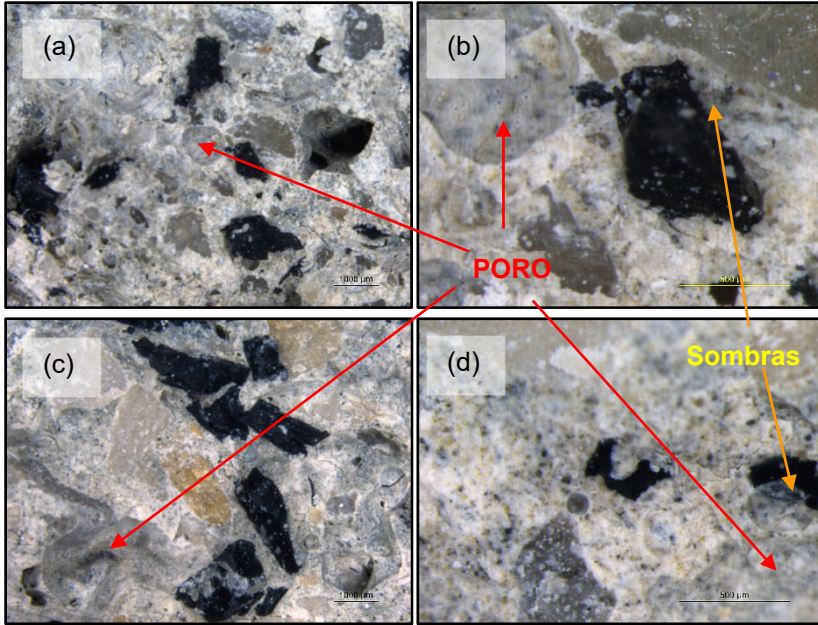


Figura 5.15 . Imágenes tomadas con microscopio óptico (a) (b) C-SC25 (c) (d) C-CC25. 8X (izquierda) 40X (derecha). Ver códigos en Tabla 4.18

En la Figura 5.16. se muestran morteros de CP con 15% de sustitución de CP por FCC y, con 25% de sustitución de árido por FC, donde de la misma forma que en los morteros de sólo CP se aprecian en ambos casos la presencia de poros (formas curvas y menos claras) (a, c) que se encuentran muy próximos a la FC (zonas de color negro), y de la deficiente unión entre la FC y la matriz, ya que se evidencia una traza irregular de la matriz y en tonos más oscuros alrededor de la FC.

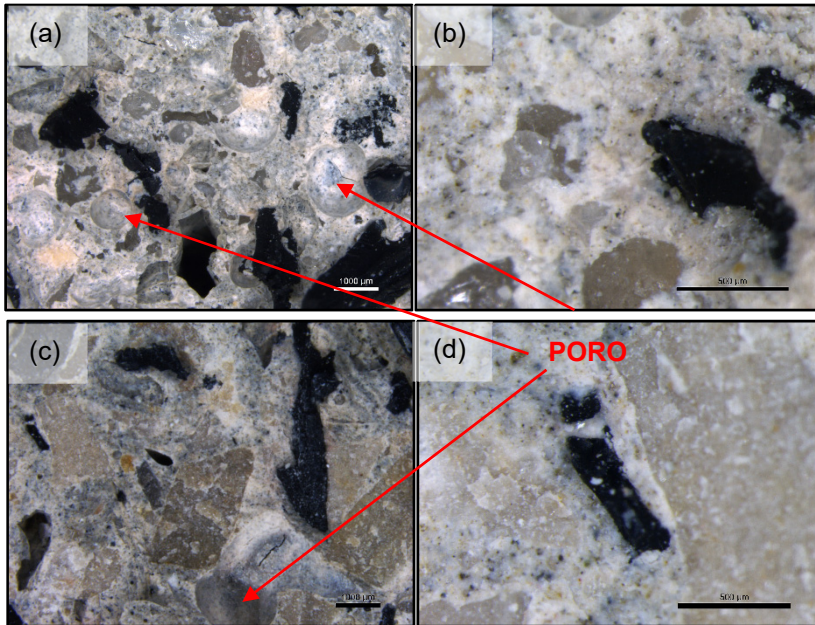


Figura 5.16 Imágenes tomadas con microscopio óptico (a) (b) CF-5C25 (c) (d) CF-CC25 8X (izquierda) 40X (derecha). Ver códigos en la Tabla 4.20

En el caso de los morteros de activación alcalina, el comportamiento es muy similar a los morteros de CP.

En la Figura 5.17 se muestran morteros de matriz geopolimérica usando como precursor FCC: se observa que en los morteros de 25% de sustitución de árido por FC, igualmente se genera una red de poros muy cerca de la FC, pero en mayor cantidad que en los morteros de CP. Cabe recordar que la relación activador/FCC es de 0,6 en peso y eso también influye en la presencia de poros en la matriz. Esta mayor presencia de poros en la estructura de la matriz corroboraría el mayor coeficiente de absorción de estos morteros. En las imágenes (b) y (d) que están a 40X se aprecian una buena adherencia FC – matriz, mejor que las observadas en las matrices de CP y CP 15%FCC.

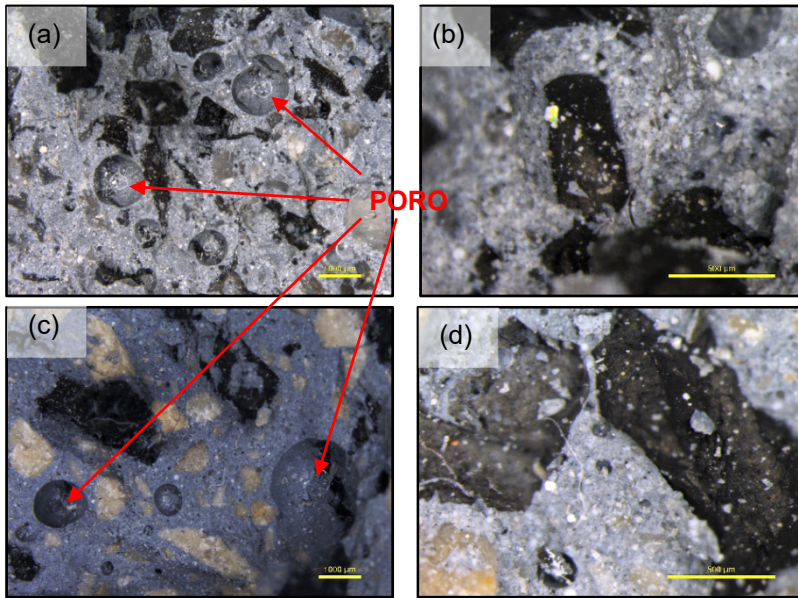


Figura 5.17 Imágenes tomadas con microscopio óptico (a) (b) FC-SC25 (c) (d) FC-CC25 8X (izquierda) 40X (derecha). Ver códigos en la Tabla 4.22

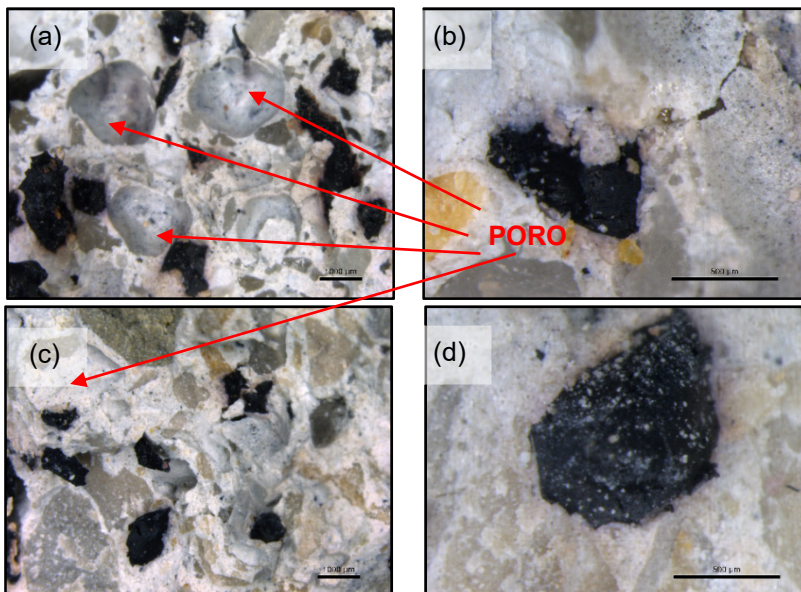


Figura 5.18 Imágenes tomadas con microscopio óptico (a) (b) SC-SC25 (c) (d) SC-CC25 8X (izquierda) 40X (derecha). Ver códigos en la Tabla 4.26

En la Figura 5.18 las imágenes mostradas son de morteros de activación alcalina usando como precursor SC, en ambos morteros, silíceo (a)(b) y calizo (c)(d) se trata de un 25% de sustitución de árido por FC. Como en los casos anteriores los poros cerca de la FC se hacen presentes dentro de la matriz, y también se observa una buena adherencia FC - matriz.

Conclusiones de densidad aparente en seco y absorción en porcentaje.

La sustitución de árido por FC en morteros de CP y cemento activado alcalinamente provoca una reducción de la densidad aparente en seco y un aumento de la absorción de agua en porcentaje (Abs) a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FN. Análogamente la densidad disminuye y el porcentaje de absorción de agua aumenta cuando la relación entre precursor/ FC disminuye.

Los morteros fabricados con árido silíceo alcanzan valores más bajos de Dap y mayor porcentaje de absorción de agua frente a los morteros fabricados con árido calizo, esto es debido a que el árido silíceo tiene menor densidad que el árido calizo y probablemente a la poca compactación de los morteros preparados con árido silíceo.

Exceptuando los morteros geopoliméricos que utilizan FCC como precursor, que presentan valores elevados del coeficiente de absorción (aproximadamente entre el 8% y 12%) el resto de morteros (CP, CP-FCC y SC) presentan coeficientes de absorción netamente inferiores entre 2 y 4% aproximadamente. Los elevados valores de los morteros geopoliméricos con precursor FCC, se debe probablemente a la mayor relación agua/precursor (0,6) que sugiere que se produzca una peor densificación y una mayor cantidad de huecos generados por las interfaces entre la fibra y la matriz cementante.

Se observa en las imágenes tomadas por microscopio óptico que en todos los morteros que tienen un porcentaje de sustitución de árido por FN, se genera una red de poros muy cerca de las FN, producto de que las FN tienden a retener aire en las grietas de su superficie.

El estudio mediante microscopía óptica muestra la existencia de poros en las proximidades de la FN (FC-FT), siendo estos poros mucho más abundantes en los morteros geopoliméricos en los que se utiliza FCC como precursor, lo que estaría de acuerdo con los valores más elevados obtenidos para los coeficientes de absorción de estos morteros. Adicionalmente se pone de manifiesto que en general la adherencia de la matriz con la FN (FC - FT) es mejor en morteros con base cemento activado alcalinamente que en los morteros con base cemento portland (CP – CP 15%FCC).

5.3 Resistencia mecánica

5.3.1 Resistencia mecánica de morteros de CP

Se fabricaron probetas de morteros de CP y morteros con sustitución de 15% de CP por FCC de acuerdo con el procedimiento establecido en el apartado 4.2.8.2.1

Los resultados de resistencias mecánicas corresponden a morteros con sustituciones de árido por FN en un 0% (control) 15% y un 25% en volumen y usando dos tipos de áridos (silíceo y calizo) y dos tipos de FN, fibra de camión (FC) y fibra de turismo (FT) curados a una temperatura de 20°C a edades de 7, 28 y 90 días. La dosificación se encuentra descrita en la Tabla 4.18 del apartado 4.2.7.1.1

En la Figura 5.19, se representa la resistencia a flexotracción (Rf) frente al porcentaje de árido sustituido por FN. En todos los casos los valores de Rf que alcanza los morteros con árido silíceo son menores con respecto a sus similares fabricados con

árido calizo, este hecho podría estar relacionado con los mayores grados de porosidad de los morteros preparados con árido silíceo, como comentábamos en el capítulo anterior. Adicionalmente los morteros que contienen FC presentan resistencias superiores a los morteros que contiene FT, esto podría ser debido a la mayor longitud de las FC frente a las FT (hasta 30 mm de longitud para las FC frente a las FT que llegan hasta 25 mm) (ver Figura 4.7). En cuanto a la sustitución de árido por FN, se observa que un reemplazo del 15% supone una reducción muy significativa de la Rf. El paso de 15% a 25% no produce una caída lineal de la resistencia a flexión.

Podemos apreciar también, que entre los 7, 28 y 90 días de curado no existe diferencias significativas de Rf, llegando incluso en algún caso a ser ligeramente inferior a los 90 días de curado, aunque atendiendo a las desviaciones estándar es difícil establecer diferencias significativas.

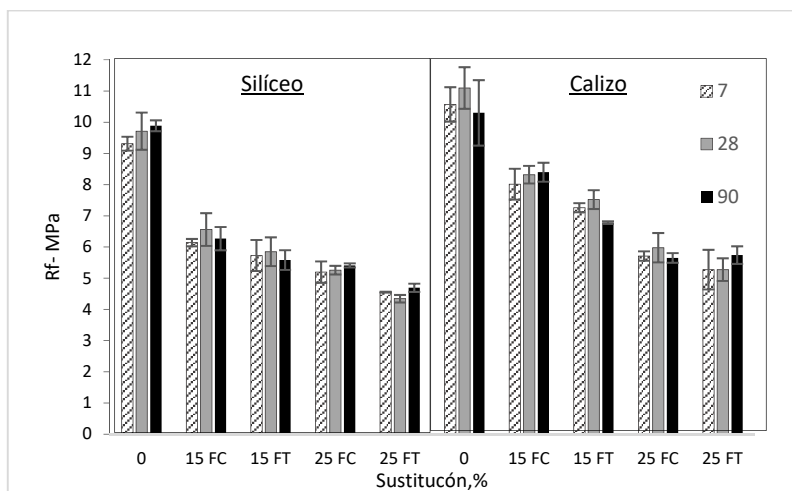


Figura 5.19 Rf morteros de CP con árido (SIL – CAL) y FC – FT . (Ver códigos en la Tabla 4.18)

En la Figura 5.20 , se representa la resistencia a compresión (Rc) frente al porcentaje de árido sustituido por FN. En todos los morteros la Rc se reduce a medida que aumenta la sustitución de árido por FN. De la misma forma que los resultados de resistencia a flexotracción, los valores alcanzados para la

resistencia a compresión usando árido calizo son mejores que los morteros con árido silíceo, esto en respuesta a que los morteros con árido calizo alcanzan mayores valores de densidad y menor absorción de agua (como vimos en el capítulo anterior) y esto se traduce en una menor presencia de poros en su estructura, alcanzando así mejores valores de resistencia. Además, el uso de la FC logra un ligero incremento con respecto a los valores de morteros usando FT.

La reducción de resistencia a compresión a 28 días de edad de los morteros con 25% de sustitución respecto a los morteros control es de 64,36% (FC) y 66,53% (FT), con árido calizo, y de 63,54% (FC) y 71,77% (FT) con árido silíceo.

La evolución a diferentes edades de curado muestra un incremento a los 90 días para todas las muestras en las que se usa árido silíceo, no así para el caso de morteros usando árido calizo que en algún caso como el 25 FC disminuye muy ligeramente la resistencia.

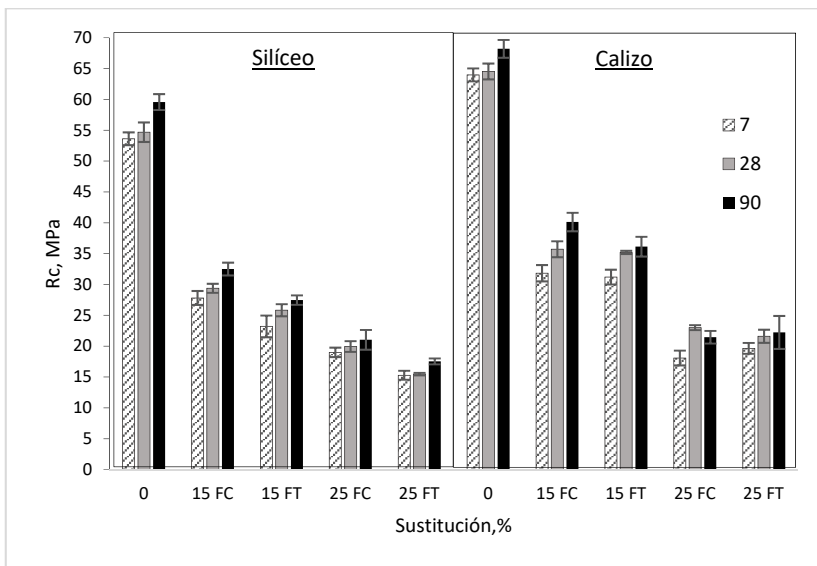


Figura 5.20 R_c morteros de CP con árido (SIL – CAL) y FC – FT (ver códigos en la Tabla 4.18)

De los resultados que se representan en la Figura 5.19 y Figura 5.20 se deduce que las incorporaciones de FN disminuyen la resistencia mecánica del mortero en esfuerzo máximo, ya sea a compresión o a flexotracción. En estudios anteriores ya registran que la pérdida de resistencia a flexión es de menor magnitud que en la resistencia a compresión [50] [20] [18][84][16][187],[242]

En la Figura 5.21 y Figura 5.22, se representan los valores de R_f y R_c , frente a la relación CP/FC, para los morteros de CP sin árido, donde podemos comparar los resultados obtenidos a 7, 28 y 90 días de curado y a 20°C. En general, en todos los casos, a medida que se va disminuyendo la relación CP/FC los valores de R_f y R_c van disminuyendo de forma gradual, llegando a reducir hasta en un 32,83% en la R_f y 61,46% en la R_c del mortero 1/1 con respecto al mortero 2/1 a la edad de 28 días. En ambos casos se evidencia un incremento de resistencia a los 90 días de curado, mostrando un crecimiento paulatino. La variación de resistencia a flexotracción entre el mortero de relación 2/1 y el de relación 1/1 oscila dentro del valor de un MPa, siendo mucho más acusadas las diferencias en la R_c , donde la diferencia es de unos 5 MPa. La reducción de resistencia a compresión a 28 días de edad del mortero con relación 2/1 respecto a los morteros control es de 85,24% con árido silíceo y 87,50% con árido calizo, lo cual estaría justificando teniendo en cuenta las diferencias entre el árido y la FC

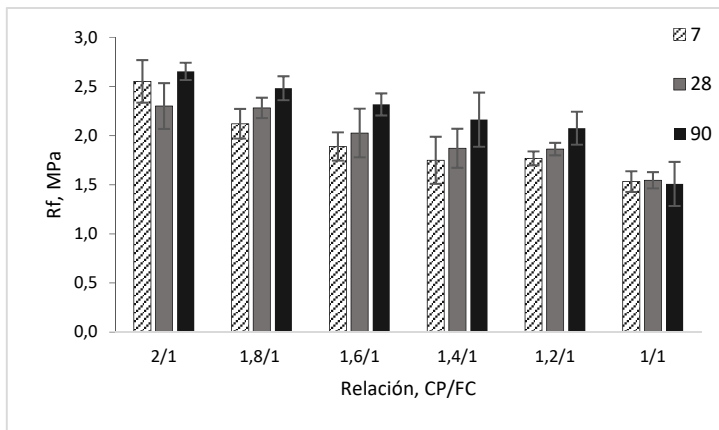


Figura 5.21 R_f morteros de CP sin árido. (ver Tabla 4.19)

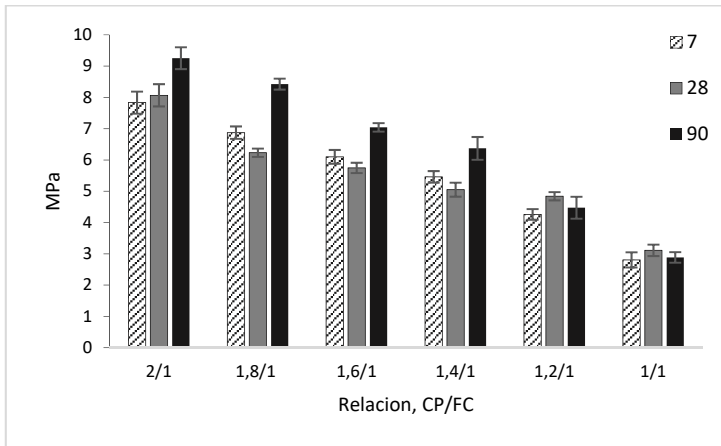


Figura 5.22 Rc morteros de CP sin árido (Ver códigos en Tabla 4.19)

Los siguientes resultados de resistencias mecánicas corresponden a los morteros de CP que tienen un 15% de sustitución de CP por FCC, con 15% y 25% de sustitución del árido (silíceo o calizo) por FC o FT, estos resultados nos permiten cotejar los resultados obtenidos en edades de 7,28 y 90 días de curado a 20°C. La dosificación se encuentra descrita en la Tabla 4.20 del apartado 4.2.7.1.1

En la Figura 5.23 se representa la resistencia a flexotracción (R_f) frente al porcentaje de árido sustituido por FN. Como en los morteros de sólo CP el detrimento aumenta a medida que se acrecienta el porcentaje de sustitución de árido por FN. De igual forma, los valores de R_f que alcanza los morteros con árido silíceo son menores con respecto a los morteros con árido calizo y entre los 28 y 90 días de curado la diferencia de resistencia no es significativa, llegando incluso en algunos casos a ser menor a la edad de 90 días.

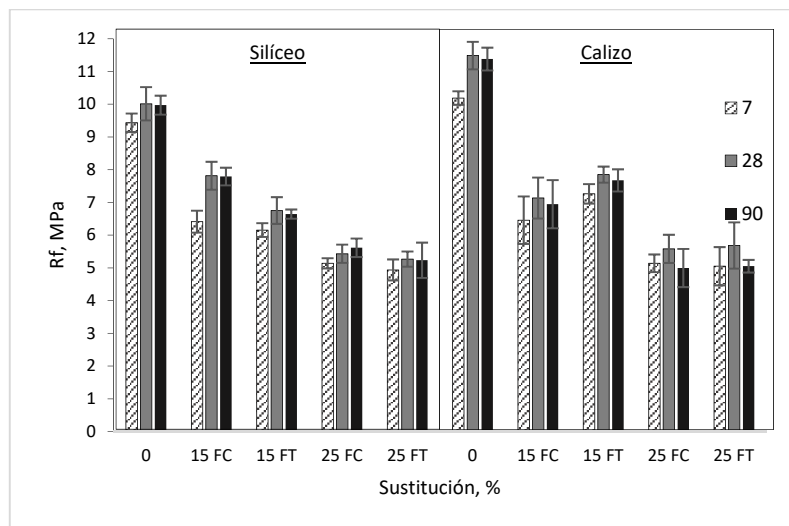


Figura 5.23 Rf morteros de CP - 15% FCC con árido (SIL-CAL) y FC FT (ver códigos en Tabla 4.20)

En la Figura 5.24, se representa la resistencia a compresión (R_c) frente al porcentaje de árido sustituido por FN. Como en los morteros de sólo CP en todos los morteros el detrimento incrementa a medida que la sustitución de FN aumenta en la dosificación. De la misma forma que los resultados de resistencia a flexión, los valores alcanzados para la resistencia a compresión usando árido calizo son mejores que los morteros con árido silíceo, en el caso del árido silíceo los morteros usando FC logra un ligero incremento con respecto a los valores de morteros usando FT, pero sucede lo contrario usando el árido calizo, diferencia que no es significativa.

La evolución a diferentes edades de curado muestra que la resistencia alcanzada a los 28 días en todos los morteros, es prácticamente igual a la de 90 días de curado. La reducción de resistencia a compresión a 28 días de edad de los morteros con 25% de sustitución respecto a los morteros control es de 68,28% (FC) y 65,75% (FT), con árido calizo y de 60,50% (FC) y 65,29% (FT) con árido silíceo.

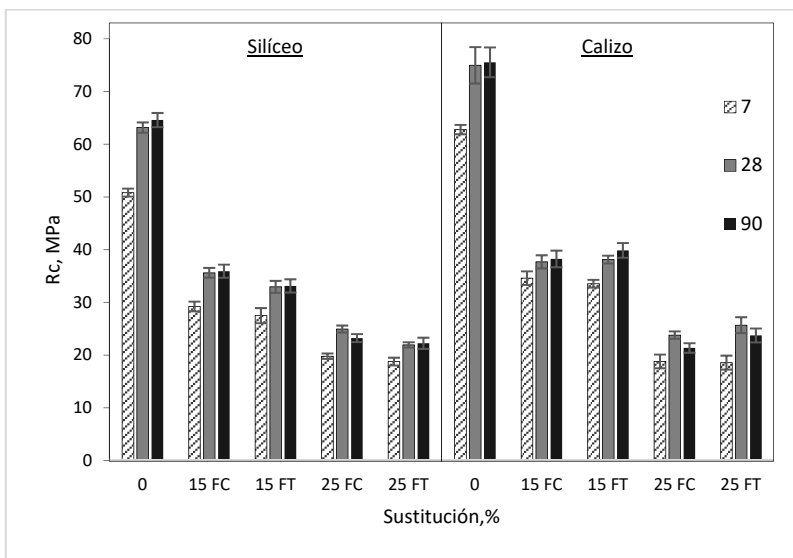


Figura 5.24 Rc morteros de CP - 15% FCC con árido (SIL - CAL) y FC – FT (ver códigos en Tabla 4.20)

En la Figura 5.25 y Figura 5.26, se representa la Rf y Rc, frente a la relación CP/FC. Se muestran los resultados de resistencia a flexotracción y compresión respectivamente para los morteros de CP y 15% de sustitución de CP por FCC sin árido, valores que nos permite comparar los resultados obtenidos a 7, 28 y 90 días de curado a 20°C. En general en todos los casos, a medida que se va disminuyendo la relación CP/FC los valores de Rf y Rc van disminuyendo de forma gradual, llegando a reducir hasta en un 37,91% en la Rf y 60,54% en la Rc del mortero con relación 1/1 con respecto al mortero con relación 2/1 en edad de 28 días. La variación en el caso de la Rf oscila dentro del valor de un MPa, el cual es mucho menor que para el caso de la Rc es superior a los 5 MPa. La reducción de resistencia a compresión a 28 días de edad del mortero con 2/1 respecto a los morteros control es de 85,27% con árido silíceo y 87,59% con árido calizo

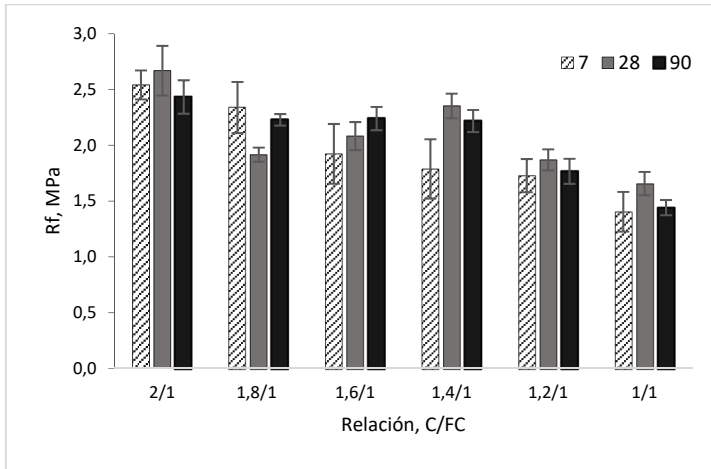


Figura 5.25 Rf morteros de CP - 15% FCC sin árido (ver códigos en Tabla 4.21)

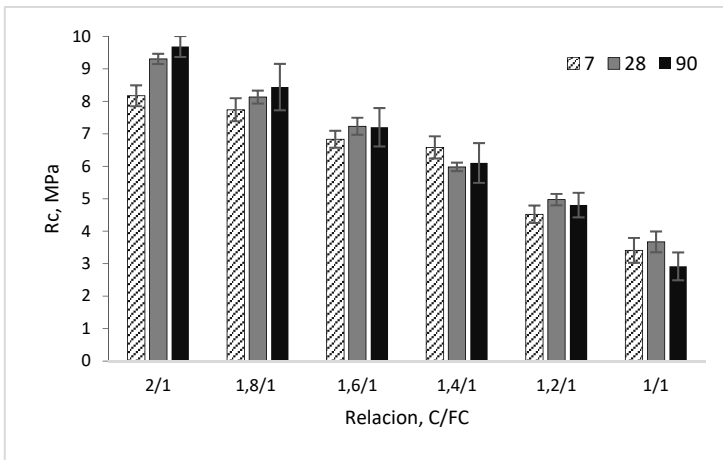


Figura 5.26 Rc morteros de CP - 15% FCC sin árido (ver códigos en Tabla 4.21)

Haciendo una comparación entre los morteros de CP versus los morteros con CP y 15% de sustitución de CP por FCC vemos lo siguiente:

En la Figura 5.27, se representa la resistencia a flexión (Rf) frente al porcentaje de árido sustituido por FN, de los morteros a edad de 28 días de curado a 20°C; vemos que en general en casi todos los morteros con árido con CP y 15% de sustitución de CP por FCC logran un incremento respecto a los morteros de

sólo CP, llegando por ejemplo hasta un incremento del +21,3% en el caso del mortero de 25% de sustitución de árido por FT. Este aumento sería debido a la reacción puzolánica del FCC con la portlandita liberada en la hidratación del cemento. El incremento de resistencia también se ve reflejado en los morteros sin árido que alcanza un +16% con respecto al mortero que lleva sólo CP.

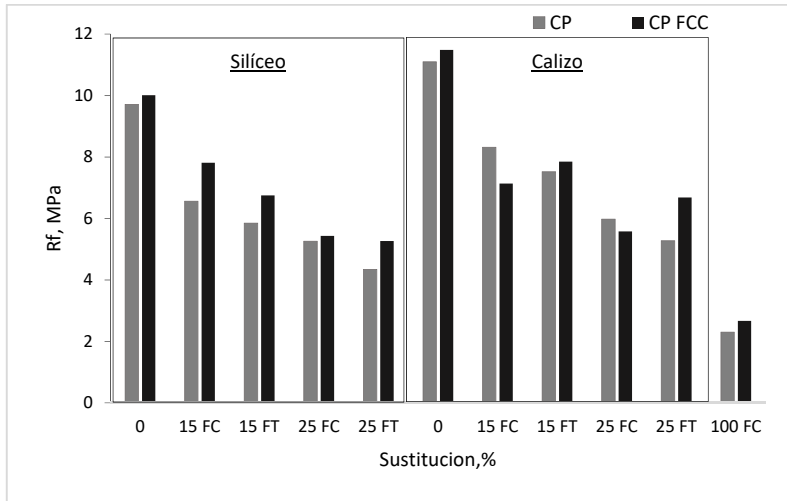


Figura 5.27 Rf de morteros de CP vs CP - 15%FCC a edad de 28 días. (ver códigos en la Tabla 4.18, Tabla 4.19, Tabla 4.20 y Tabla 4.21)

En la Figura 5.28, se representa la resistencia a compresión (R_c) frente al porcentaje de árido sustituido por FN, de los morteros a edad de 28 días de curado y 20°C. Vemos que todos los morteros con CP y 15% de sustitución de CP por FCC logran un incremento respecto a los morteros de sólo CP llegando a incrementos del +41,7% en el caso del mortero de árido silíceo y 25% de sustitución de árido por FT. Estas mejoras que el FCC logra en los morteros de CP es debido a la reactividad puzolánica del FCC. Además de las mejoras de las propiedades mecánicas, se logra disminuir el uso de CP en la fabricación de los morteros y optimizar un residuo industrial que en este caso es el FCC, traducándose esta mejora en términos medioambientales y económicos. También para los morteros

con solo fibra se observa un ligero incremento con la participación de FCC en la mezcla.

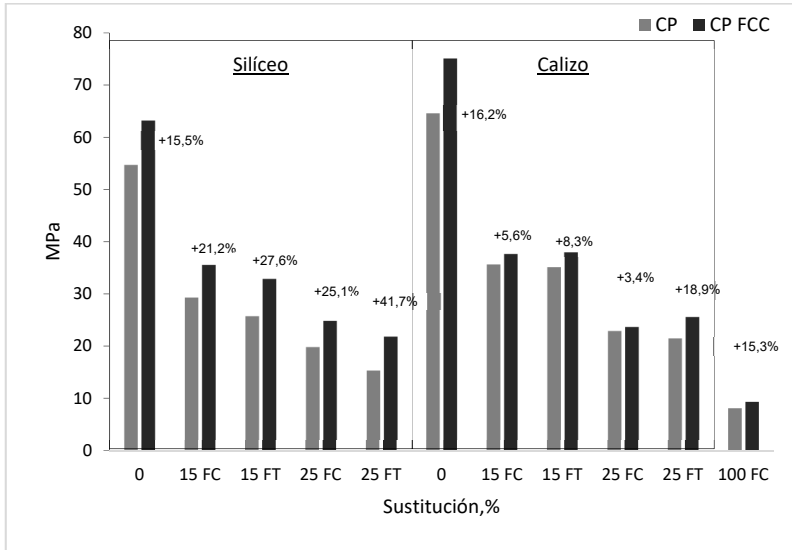


Figura 5.28 Rc de morteros de CP vs CP - 15%FCC a edad de 28 días. (ver códigos en la Tabla 4.18, Tabla 4.19, Tabla 4.20 y Tabla 4.21)

5.3.2 Resistencia mecánica de morteros de FCC - CCA

Se fabricaron probetas de mortero de FCC como material precursor y una mezcla de agua, hidróxido de sodio (NaOH) y CCA de acuerdo con el procedimiento establecido en el apartado 4.2.8.2.2.

Se usaron dos tipos de curado para los morteros, unos curados en cámara húmeda a temperatura ambiente descritos en el apartado del capítulo 4.2.8.3.2 y otros curados en baño térmico a 65°C descritos en el capítulo 4.2.8.3.1

Los resultados de resistencias mecánicas corresponden a morteros de FCC con sustitución de árido por FC en un 0% (control) 15% y un 25% en volumen y usando dos tipos de áridos (silíceo y calizo), curados en cámara húmeda a 20°C a edades de 7, 28 y 90 días. La dosificación se encuentra descrita en la Tabla 4.22 del apartado 0

En la Figura 5.29, se representa la resistencia a flexotracción (R_f) frente al porcentaje de árido sustituido por FC. Para los valores alcanzados de los morteros con árido silíceo y árido calizo, los resultados son muy similares. Podemos constatar también, que a 7, 28 días de curado se aprecia un incremento, llegando a valores cercanos a los 5 MPa en sustituciones del 25%, pero a la edad de 90 días de curado la resistencia disminuye de forma no muy significativa, ya que en la mayoría de los casos esta disminución es inferior a 0,5 MPa.

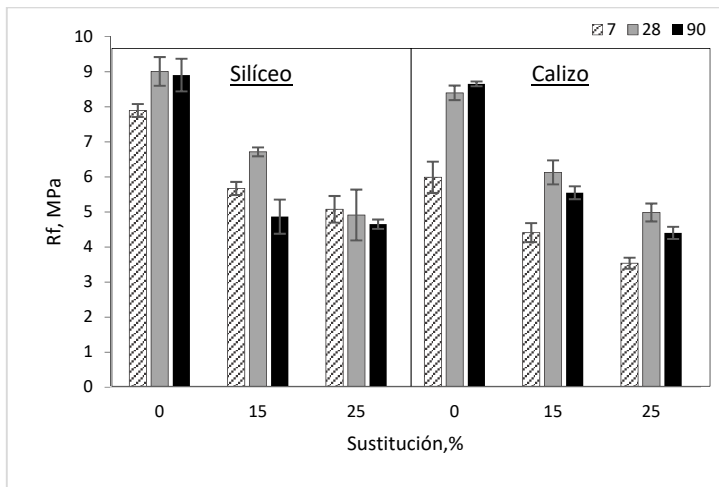


Figura 5.29 R_f de morteros de FCC-CCA con árido silíceo y calizo y FC curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C.

En la Figura 5.30, se representa la resistencia a compresión (R_c) frente al porcentaje de árido sustituido por FC de los morteros con 0%, 15% y 25% de sustitución de árido por FC a 7, 28 y 90 días de curado en cámara húmeda a 20°C. En todos los morteros se observa una disminución de la R_c a medida que la sustitución de FC aumenta en la dosificación. De la misma forma que los resultados de resistencia a flexotracción, los valores alcanzados para la resistencia a compresión usando árido calizo son similares a los morteros con árido silíceo. La reducción de resistencia a compresión a 28 días de edad de los morteros con

25% de sustitución respecto a los morteros control es de 52,51% con árido silíceo y de 57,41% con árido calizo.

Para todas las muestras la evolución a diferentes edades de curado muestra que, a la edad de 90 días, las resistencias se mantienen prácticamente sin variación, incluso con leves descensos.

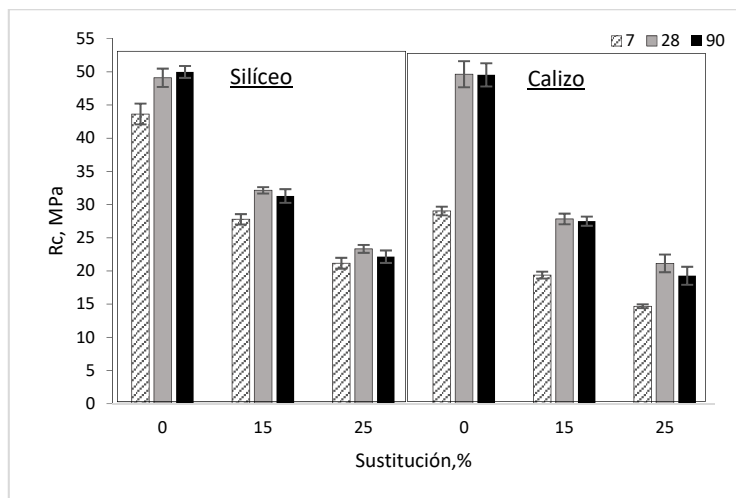


Figura 5.30 Rc de morteros de FCC-CCA con árido silíceo y calizo y FC curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C

En general podemos afirmar que los resultados obtenidos tanto para Rf como Rc son los esperados cuando el árido se sustituye parcialmente por fibra de neumático, lo cual ha sido recogido en la bibliografía por otras investigaciones de geopolímeros con partículas de caucho. [13],[178], [183]–[185]

En la Figura 5.31 y Figura 5.32, se representan las resistencias mecánicas (Rf) (Rc) respectivamente, frente a la relación FCC/FC de los morteros de activación alcalina usando FCC como precursor y sin árido. Los morteros fueron curados durante 7,28 y 90 días de edad y una temperatura de 20°C en cámara húmeda. En los dos casos la Rf y Rc, a medida que va disminuyendo la relación FCC/FC los valores de Rf y Rc van

disminuyendo de forma gradual, llegando a reducir hasta en un 43,24% en la Rf y 62,05% en la Rc del mortero con relación 1/1 con respecto al mortero de relación 2/1 a la edad de 28 días. En ambos casos no se muestra un incremento a los 90 días de curado, sino, más bien se mantiene los valores muy similares a los 28 días de curado. La reducción de resistencia a compresión a 28 días de edad del mortero con relación 2/1 FCC/FC respecto a los morteros control es un 83 % aproximadamente para ambos áridos

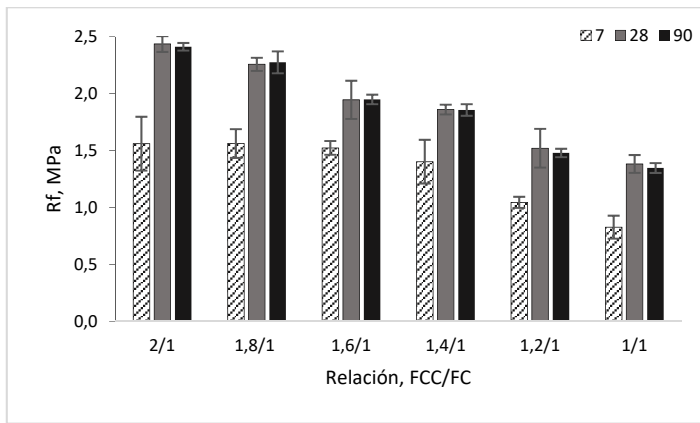


Figura 5.31 Rf de morteros de FCC – CCA sin árido curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C. (Ver dosificación en la

Tabla 4.23)

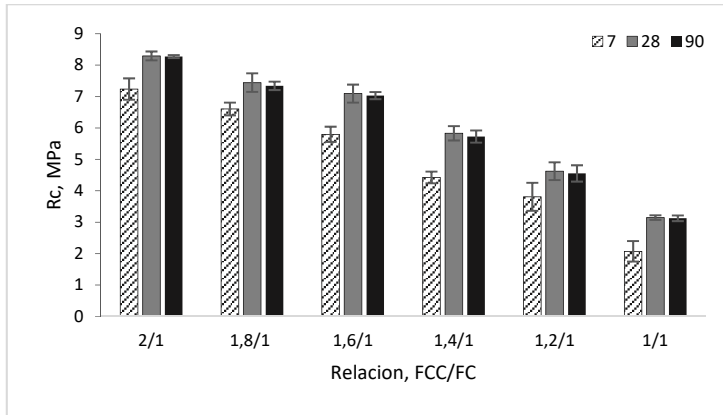


Figura 5.32 Rc de morteros de FCC – CCA sin árido curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C

Los siguientes resultados de resistencias mecánicas corresponden a morteros con sustitución de árido por FC en un 0% (control) 15% y un 25% en volumen y usando dos tipos de áridos (silíceo y calizo), curados en baño térmico a 65 °C a edades de 1, 3 y 7 días. La dosificación se encuentra descrita en la Tabla 4.22 del apartado 0

En la Figura 5.33, se representa la resistencia a flexotracción (R_f) frente al porcentaje de árido sustituido por FC donde nos permite comparar los resultados obtenidos a 1,3 y 7 días de curado en baño térmico a 65°C. Para los valores alcanzados por los morteros con árido silíceo presentan un ligero mejor comportamiento durante los días 1 y 3 de curado frente a los morteros de árido calizo, pero en general en las 3 dosificaciones (0%, 15% y 25%) esta diferencia se acorta a menos de un MPa a la edad de 7 días llegando a tener resistencias similares.

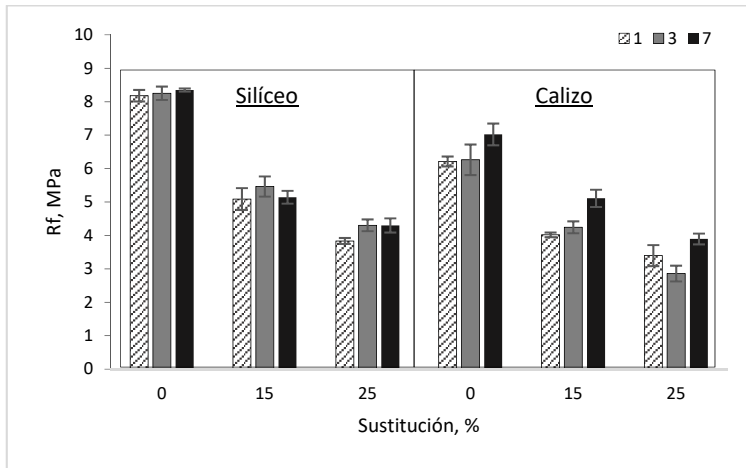


Figura 5.33 Rf de morteros de FCC-CCA con árido síliceo y calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C

En la Figura 5.34, se representa la resistencia a compresión (R_c) frente al porcentaje de árido sustituido por FC de los morteros con 0%, 15% y 25% de sustitución de árido por FC a 1,3 y 7 días de curado en baño térmico a 65°C. Observamos que en todos los morteros el detrimento incrementa a medida que la sustitución de árido por FC aumenta en la dosificación. De la misma forma que los resultados de resistencia a flexotracción, los valores alcanzados para la resistencia a compresión usando árido síliceo logran un ligero mejor resultado (pero no significativo) que los morteros con árido calizo. La reducción de resistencia a compresión a 7 días de edad de los morteros con 25% de sustitución respecto a sus respectivos morteros control es de 55,53% con árido síliceo y de 61,39% con árido calizo.

La evolución para todas las muestras de árido síliceo entre los días 3 y 7 de edad no muestra un incremento de sus valores, mientras que para los morteros de árido calizo si evidencia un incremento en el día 7 de curado, mostrándose una evolución en el tiempo y equiparando sus resistencias con los morteros de árido síliceo.

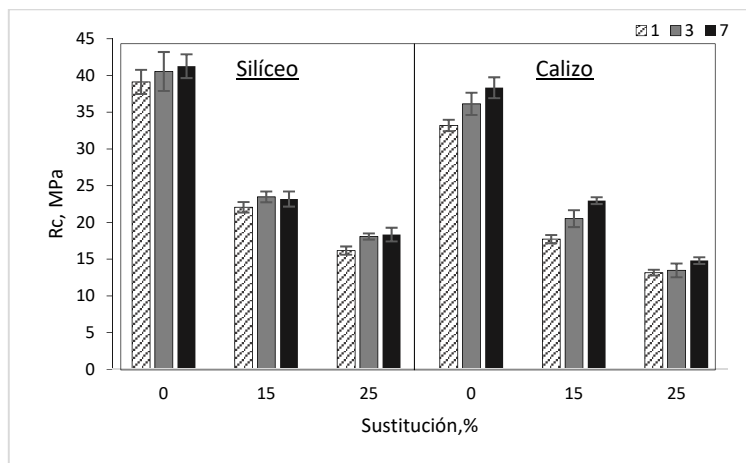


Figura 5.34 Rc de morteros de FCC-CCA con árido silíceo y calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C

En las figuras 5.35 y 5.36, se representan las resistencias mecánicas (R_f) (R_c), frente a la relación FCC/FC de los morteros de activación alcalina usando FCC como precursor y sin árido, morteros curados a 1,3 y 7 días de edad y una temperatura de 65°C en baño térmico. En general en todos los casos, a medida que se va disminuyendo la relación FCC/FC los valores de R_f y R_c van disminuyendo de forma gradual, llegando a reducir hasta en un 53,83% en la R_f y 59,03% en la R_c del mortero de relación 1/1 con respecto al mortero de relación 2/1 en edad de 7 días. En ambos casos no se muestra un incremento a los 7 días de curado, sino, más bien se mantiene los valores muy similares a los 3 días de curado. La reducción de resistencia a compresión a 7 días de edad del mortero con relación 2/1 con respecto a los morteros control es de 82,45% con árido silíceo y 81,57% con árido calizo

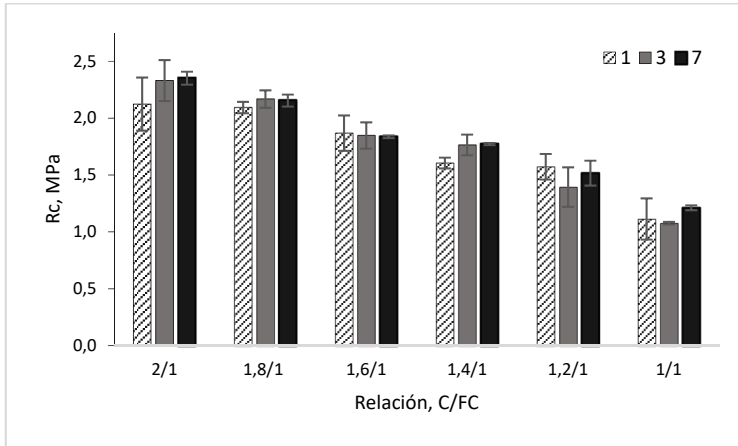


Figura 5.35 Rf de morteros de FCC – CCA sin árido curados en baño térmico a una temperatura de 65°C. (Ver dosificación en la

Tabla 4.23)

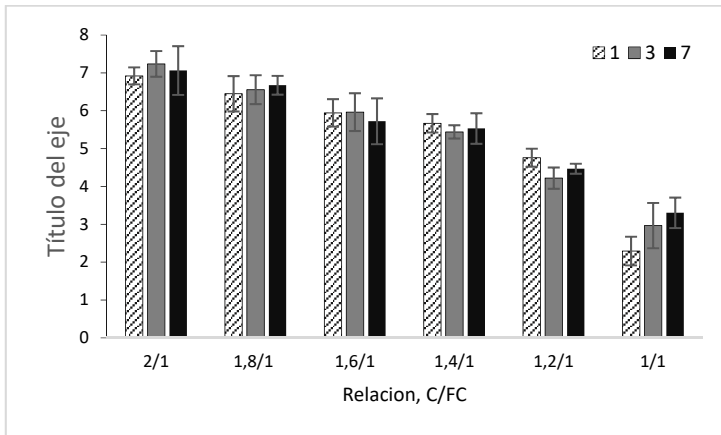


Figura 5.36 Rc de morteros de FCC – CCA sin árido curados en baño térmico a una temperatura de 65°C. (Ver dosificación en la

Tabla 4.23)

En la Figura 5.37, se representa la resistencia a flexotracción (Rf) frente al porcentaje de árido sustituido por FC donde se compara los resultados obtenidos a 7 días de curado en baño térmico a 65°C vs los morteros curados a 28 días de edad en cámara húmeda a 20°C. En general observamos que los

resultados de resistencia a flexotracción a edad de 28 días de curado y 20 °C, logran un incremento respecto a los morteros curados a 7 días y a una temperatura de 65 °C, llegando por ejemplo hasta un incremento del +14,3% y +28,0% en los casos de los morteros de 25% de sustitución de FC. El incremento de resistencia también se ve reflejado en los morteros sin árido que alcanza +3,6% con respecto al mortero curado a 7 días y a 65°C de temperatura.

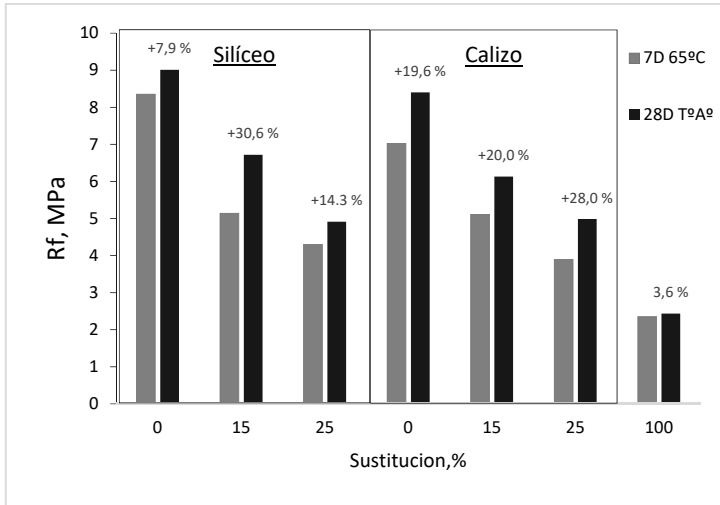


Figura 5.37 Rf de morteros de FCC-CCA con árido silíceo - calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C vs curados a 20°C en cámara húmeda.

En la Figura 5.38. se representa la resistencia a compresión (Rc) frente al porcentaje de árido sustituido por FC donde nos permite comparar los resultados obtenidos a 7 días de curado en baño térmico a 65°C vs los morteros curados a 28 días en cámara húmeda a 20°C. De igual forma que los resultados a flexión vemos que los resultados de resistencia a compresión a edad de 28 días de curado y 20 °C, logran un incremento respecto a los morteros curados a 7 días y a una temperatura de 65 °C. Por ejemplo, en los resultados de los morteros con 25% de sustitución, se observa un incremento de un +27,1 % y +42,9 % con respecto a los morteros curados a 7 días y 65 °C, de la misma forma se ve reflejado en los morteros sin árido que

alcanza un +17,4 % con respecto al mortero curado a 7 días y a 65°C de temperatura.

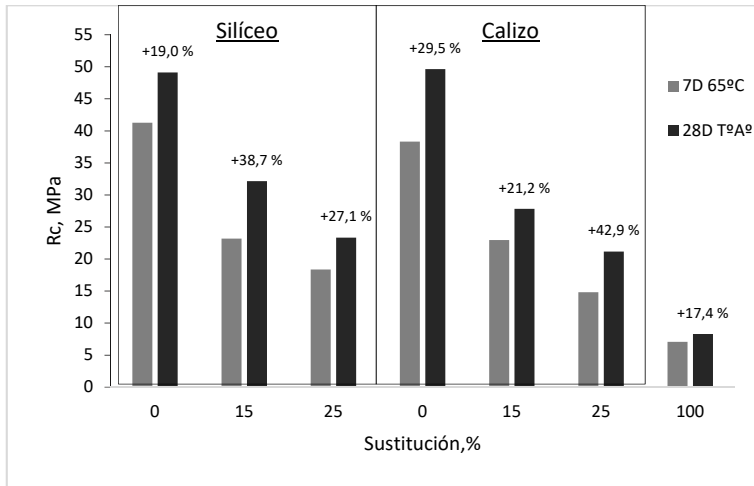


Figura 5.38 Rc de morteros de FCC-CCA con árido silíceo - calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C vs curados a 20°C en cámara húmeda.

Las condiciones de curado influyen significativamente sobre las propiedades mecánicas de los morteros de activación alcalina. Variables como la temperatura, el tiempo y la humedad relativa son factores a tener en cuenta para poder conseguir buenos resultados de resistencia mecánica y durabilidad en los conglomerantes activados alcalinamente.[162],[169] En experiencias anteriores ya se registra que el curado a elevadas temperaturas acelera la formación de una estructura compacta y a edades muy tempranas. Pero, cuando el curado se realiza a temperatura ambiente los productos de la reacción aumentan más lentamente por lo que su calidad es superior en términos de porosidad y resistencia.[13], [243].

Otras investigaciones dan muestra que a largas edades de curado y elevada temperatura se debilita la estructura del gel provocando retracción, mientras que a temperatura ambiente sería beneficioso en conglomerantes activados alcalinamente como los basados en ceniza volante [244].

Se recomienda que el curado se haga teniendo un 100% de humedad relativa para evitar fenómenos de retracción lo que provocaría una reducción de la resistencia mecánica.

Viendo los precedentes sobre la influencia de las diferentes condiciones de curado, podemos entender mejor los resultados de la Figura 5.37 y Figura 5.38 y dar respuesta al porqué los morteros curados en cámara húmeda y a 20 °C obtienen mayores resistencias mecánicas que los morteros curados a 65°C y en baño térmico.

5.3.3 Resistencia mecánica de morteros de SC

Se fabricaron probetas de mortero de SC como material precursor y una mezcla de agua y carbonato sódico (Na_2CO_3) como catalizador, de acuerdo con el procedimiento establecido en el apartado 4.2.8.2.2

Se usaron dos tipos de curado para los morteros, unos curados en cámara húmeda a temperatura ambiente descritos en el apartado del capítulo 4.2.8.3.2 y otros curados en baño térmico a 65°C descritos en el apartado del capítulo 4.2.8.3.1

Los resultados de resistencias mecánicas corresponden a morteros de SC con sustitución de árido por FC en un 0% (control) 15% y un 25% en volumen y usando dos tipos de áridos (silíceo y calizo), curados en cámara húmeda a 20°C a edades de 7, 28 y 90 días. La dosificación se encuentra descrita en la Tabla 4.26 del apartado 4.2.7.1.3

En la Figura 5.39, se representa la resistencia a flexotracción (R_f) frente al porcentaje de árido sustituido por FC. En el caso de los valores alcanzados en la R_f los morteros con árido calizo logran mejores resultados respecto a los morteros con árido silíceo. Podemos apreciar también, que entre 28 y 90 días de curado no se observa un incremento significativo, manteniéndose por ejemplo en valores que rondan los 5 MPa en sustituciones del 25%.

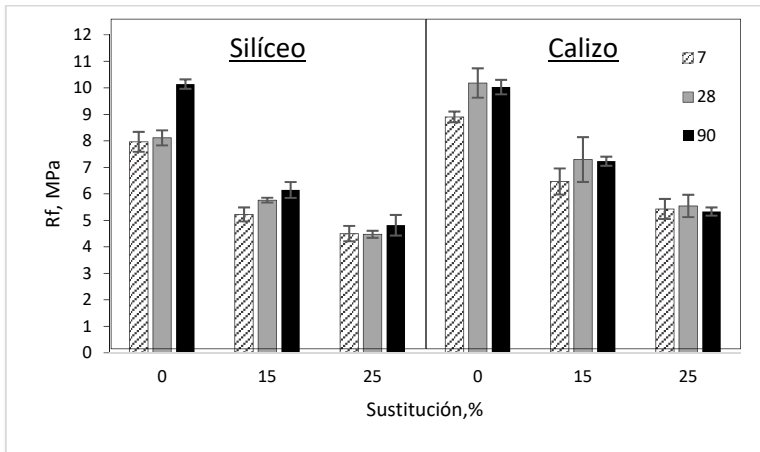


Figura 5.39 Rf de morteros de SC con árido silíceo y calizo y FC curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C.

En la Figura 5.40, se representa la resistencia a compresión (R_c) frente al porcentaje de árido sustituido por FC de los morteros con 0%, 15% y 25% de sustitución de árido por FC a 7, 28 y 90 días de curado en cámara húmeda a 20°C. En todos los morteros se observa una disminución de la R_c a medida que la sustitución de FC aumenta en la dosificación. De la misma forma que los resultados de resistencia a flexotracción, los valores alcanzados para la resistencia a compresión usando árido calizo son superiores a los morteros con árido silíceo. La reducción de resistencia a compresión a 28 días de edad de los morteros con 25% de sustitución respecto a los morteros control es de 56,70% con árido silíceo y de 61,97% con árido calizo.

Para las muestras a 15 % y 25 % de sustitución, la evolución a diferentes días de curado muestra que, a edad de 90 días, las resistencias se mantienen prácticamente constantes con respecto a los 28 días.

En general podemos afirmar que los resultados obtenidos tanto para R_f como R_c son los esperados cuando el árido se sustituye parcialmente por fibra de neumático, lo cual coincide con el comportamiento de los morteros geopoliméricos de FCC

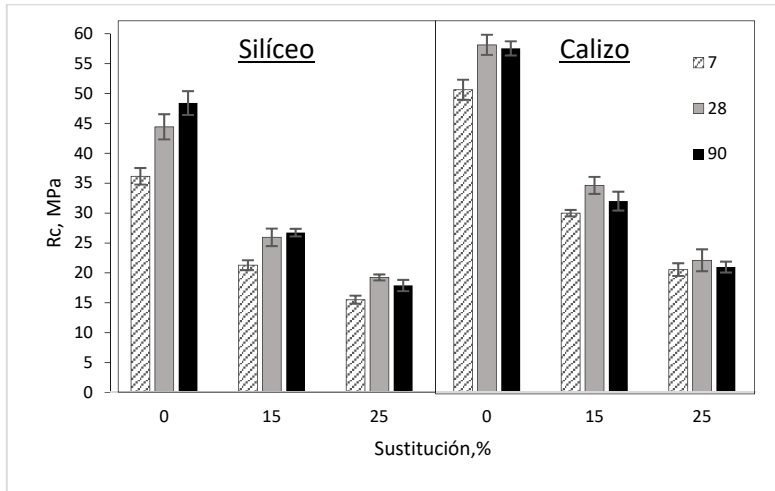


Figura 5.40 Rc de morteros de SC con árido silíceo y calizo y FC curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C.

En la Figura 5.41 y Figura 5.42 , se representan las resistencias mecánicas (Rf) (Rc), frente a la relación SC/FC de los morteros de activación alcalina usando SC como precursor y sin árido, morteros curados a 7,28 y 90 días de edad y una temperatura de 20°C en cámara humedad. En ambos casos Rf y Rc, a medida que se va disminuyendo la relación SC/FC los valores de Rf y Rc van disminuyendo de forma gradual, llegando a reducir hasta en un 46,18% en la Rf y 73,14% en la Rc del mortero con relación 1/1 con respecto al mortero con relación 2/1 en edad de 28 días. En general se ve un incremento a los 90 días de curado. La reducción de resistencia a compresión a 28 días de edad del mortero con relación 2/1 SC/FC respecto a los morteros control es de 82,20% con árido silíceo y 86,40% con árido calizo

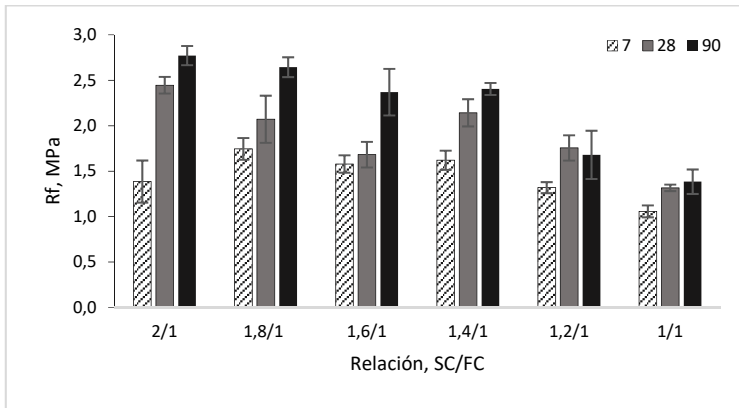


Figura 5.41 Rf de morteros de SC sin árido curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C. (Ver dosificación en la Tabla 4.26)

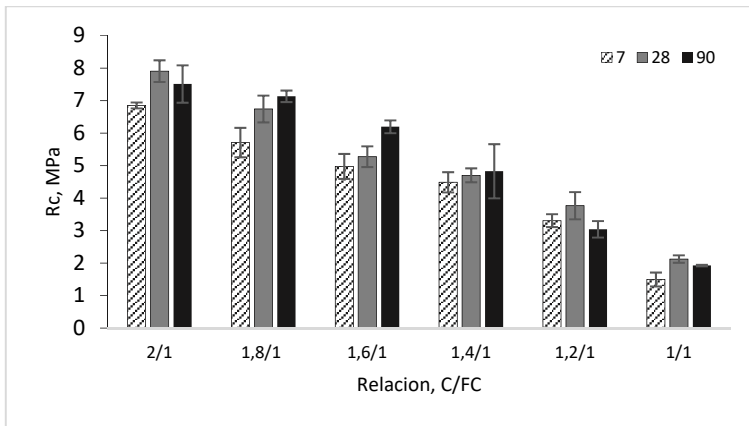


Figura 5.42 Rc de morteros de SC sin árido curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C. (Ver dosificación en la Tabla 4.26)

Los siguientes resultados de resistencias mecánicas corresponden a morteros de SC con sustitución de árido por FC en un 0% (control) 15% y un 25% en volumen y usando dos tipos de áridos (silíceo y calizo), curados en baño térmico a 65 °C a edades de 1, 3 y 7 días. La dosificación se encuentra descrita en la Tabla 4.26 del apartado 4.2.7.1.3

En la Figura 5.43, se representa la resistencia a flexotracción (R_f) frente al porcentaje de árido sustituido por FC donde se comparan los resultados obtenidos a 1,3 y 7 días de curado en baño térmico a 65°C. En el caso de los valores alcanzados en la R_f los morteros con árido silíceo y calizo presentan un comportamiento similar. Podemos apreciar también, que entre los días 3 y 7 de curado ambos morteros mantienen sus valores sin mostrar ningún incremento.

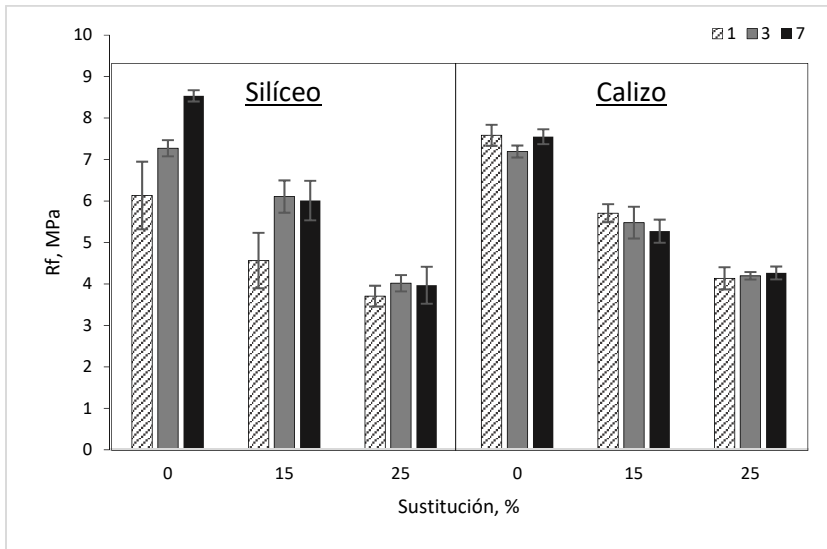


Figura 5.43 R_f de morteros de SC con árido silíceo y calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C

En la Figura 5.44, se representa la resistencia a compresión (R_c) frente al porcentaje de árido sustituido por FC donde nos permite comparar los resultados obtenidos en 1,3 y 7 días de curado en baño térmico a 65°C. De la misma forma que los resultados de resistencia a flexión, los valores alcanzados para la resistencia a compresión usando árido silíceo son muy similares a los resultados de los morteros con árido calizo. La reducción de resistencia a compresión a 7 días de edad de los morteros con 25% de sustitución respecto a los morteros control es de 64,55% con árido silíceo y de 69,32% con árido calizo.

La evolución para todas las muestras con árido entre los días 3 y 7 de edad no muestra un incremento de sus valores, manteniéndose los valores al día 7 de curado.

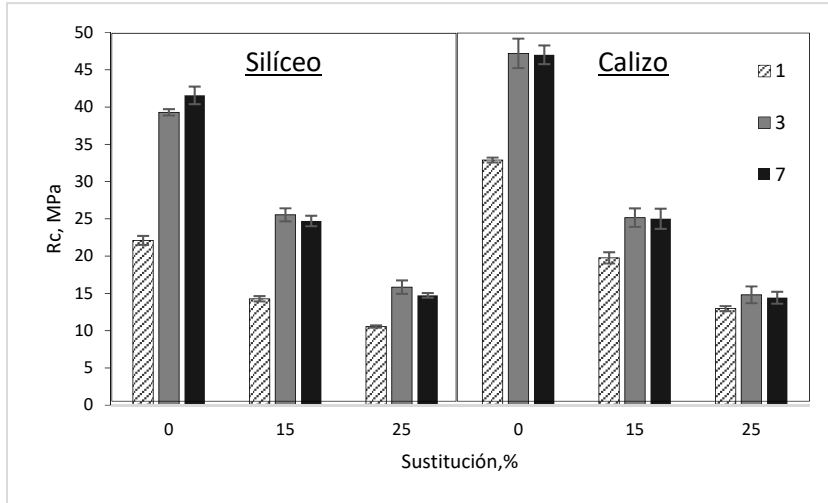


Figura 5.44 Rc de morteros de SC con árido silíceo y calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C

En la Figura 5.45 y Figura 5.46, se muestran los resultados de resistencia a flexión y compresión respectivamente para los morteros de SC sin árido, morteros curados a 1,3 y 7 días de edad y una temperatura de 65°C en baño térmico. En general a medida que se va disminuyendo la relación SC/FC los valores de Rf y Rc van disminuyendo de forma gradual, llegando a reducir hasta en un 36,96% en la Rf y 72,10% en la Rc del mortero con relación 1/1 con respecto al mortero de relación 2/1 en edad de 7 días. En ambos casos no se muestra una diferencia significativa entre los 3 y 7 días de edad, sino, mantiene los valores muy similares. La reducción de resistencia a compresión a la edad de 7 días del mortero con relación 2/1 respecto a los morteros control es de 83,39% con árido silíceo y 85,31% con árido calizo

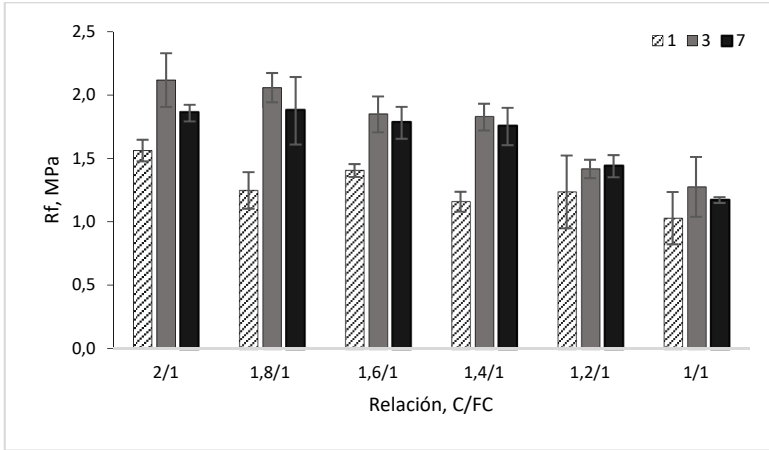


Figura 5.45 Rf de morteros de SC sin árido curados en baño térmico a una temperatura de 65°C. (Ver dosificación en la Tabla 4.27)

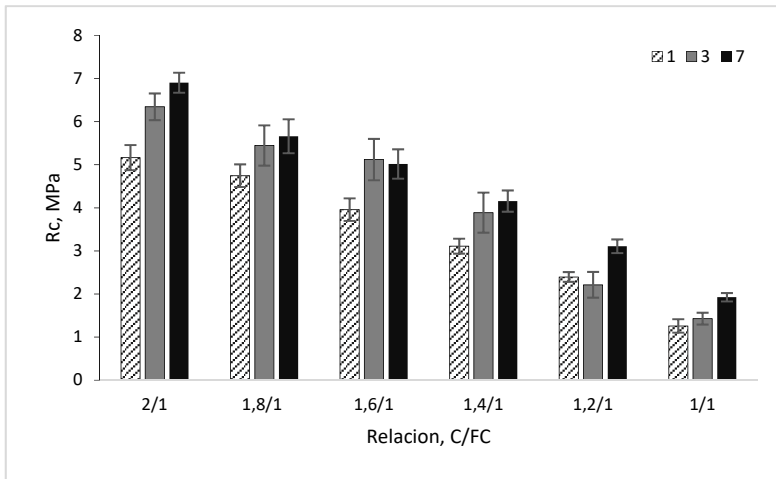


Figura 5.46 Rc de morteros de SC sin árido curados en baño térmico a una temperatura de 65°C. (Ver dosificación en la Tabla 4.27)

Haciendo una comparación en la Figura 5.47, se representa la resistencia a flexotracción (Rf) frente al porcentaje de árido sustituido por FC donde se compara los resultados obtenidos a 7 días de curado en baño térmico a 65°C vs los morteros curados a 28 días en cámara húmeda a 20°C. Para los morteros con árido silíceo, vemos que los resultados de resistencia a flexión a edad de 28 días de curado y 20 °C, son muy similares a los valores

alcanzados a 7 días y a una temperatura de 65 °C. No pasa lo mismo con los morteros con árido calizo, donde los morteros curados a 20 °C y 28 días de edad, superan a los curados a 65°C y 7 días de edad. En ambos casos se alcanza hasta un incremento del +12,8% y +30,1 % en los casos de los morteros de 25% de sustitución de FC. El incremento de resistencia también se ve reflejado en los morteros con 100% FC que alcanza un +31,6% con respecto al mortero curado a 7 días y a 65°C de temperatura.

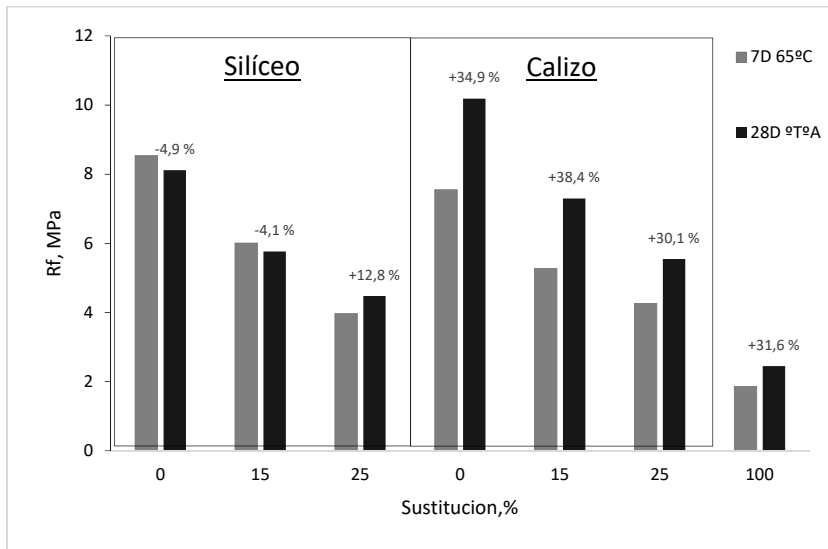


Figura 5.47 Rf de morteros de SC con árido silíceo - calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C vs curados a 20°C en cámara húmeda

En la Figura 5.48. se representa la resistencia a compresión (Rc) frente al porcentaje de árido sustituido por FC donde nos permite comparar los resultados obtenidos a 7 días de curado en baño térmico a 65°C frente a los morteros curados a 28 días en cámara húmeda a 20°C. Para todos los casos, vemos que los resultados de resistencia a compresión a edad de 28 días de curado y 20 °C, logran un incremento respecto a los morteros curados a 7 días y a una temperatura de 65 °C. Por ejemplo, en los resultados de los morteros con 25% de sustitución, se observa un incremento de un +30,6 % y +53,4 % con respecto a

los morteros curados a 7 días y 65 °C, mejorando así las características del material. De la misma forma se ve reflejado en los morteros sin árido que alcanza un +14,5 % con respecto al mortero curado a 7 días y a 65°C de temperatura.

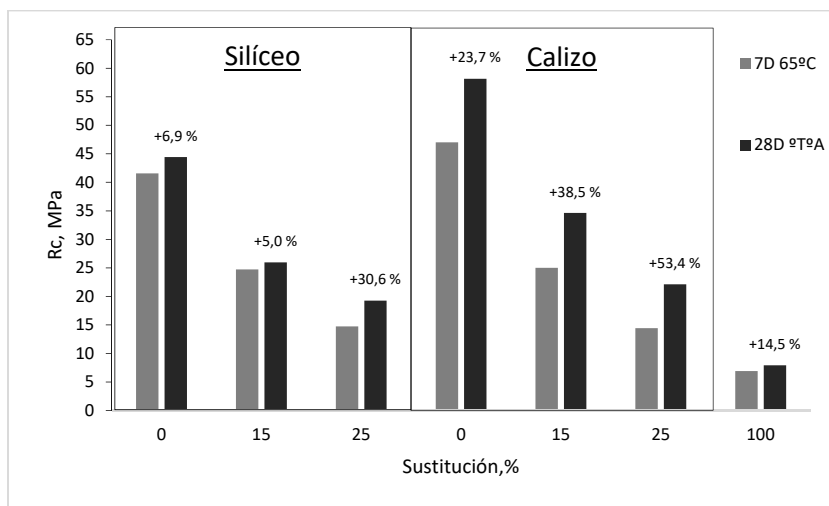


Figura 5.48 Rc de morteros de SC con árido silíceo - calizo y FC curados en baño térmico a una temperatura 65°C vs curados a 20°C en cámara húmeda

Como ya vimos en el apartado anterior y revisando la bibliografía relacionada a la influencia que ejerce las diferentes condiciones de curado en los morteros de activación alcalina, vemos que el comportamiento de los morteros usando SC como precursor es muy similar a los mencionados por otros autores; que logra mejores resultados cuando son curados a baja temperatura, con 100% de HR y periodos más largos.

5.3.4 Comparación de las resistencias mecánicas de los morteros

En la Figura 5.49 y Figura 5.50 se representa la resistencia a flexotracción (Rf) de los morteros con árido silíceo y árido calizo respectivamente, con base CP y base CAA, frente al porcentaje de árido sustituido por FC. Los resultados muestran que los morteros con árido silíceo, la sustitución del 15% de CP por FCC

en los morteros de CP optimiza sus propiedades mecánicas; tanto en 15 % como en 25% de sustitución de árido por FC. Los morteros de FCC alcanzan valores muy similares a los morteros de CP, siendo los morteros de SC los que alcanzan valores menores dentro de este grupo, diferencias que no significativas, ya que son menor a 1 MPa.

Para los morteros con árido calizo, las resistencias de los morteros de SC son los que más se asemejan a los morteros de CP. siendo los más desfavorecidos los morteros con FCC, pero como en el árido silíceo, estas diferencias no son significativas.

Para los morteros sin árido, los morteros de activación alcalina de FCC y SC obtienen resultados que superan al valor que alcanza el mortero de CP.

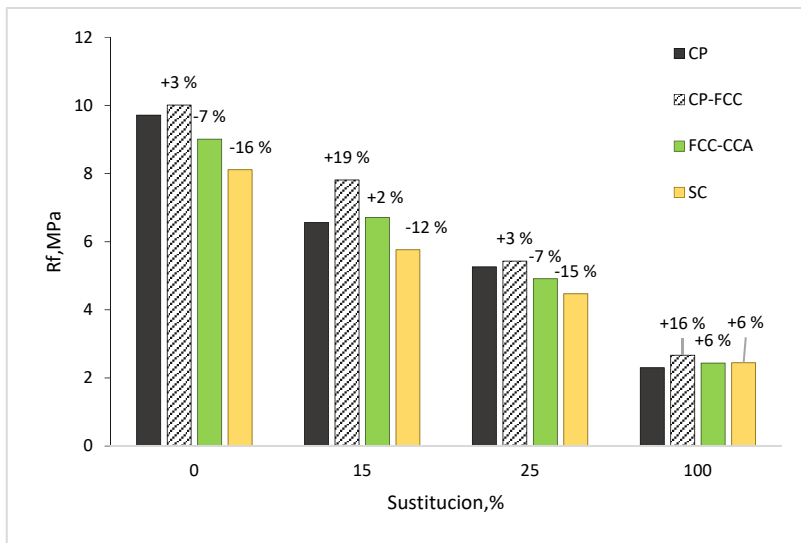


Figura 5.49 Rf. morteros de CP, FCC y SC con árido silíceo a 28 días de edad curados en cámara húmeda a 20 °C

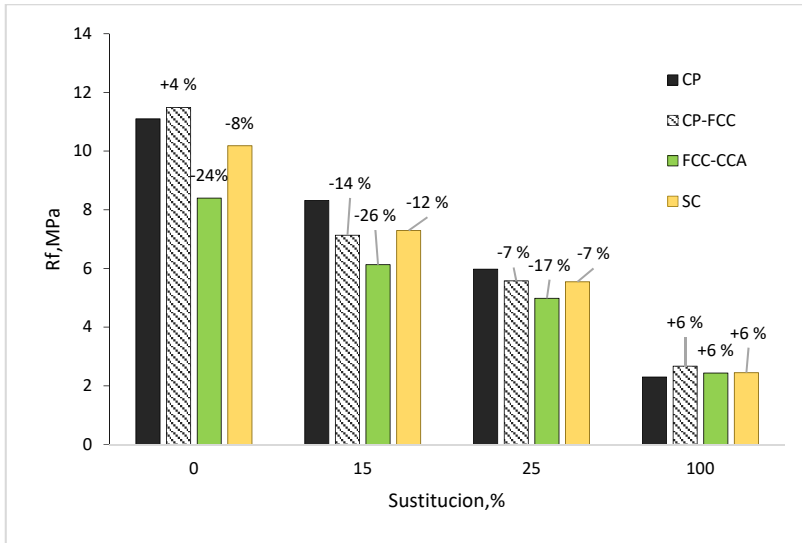


Figura 5.50 Rf. morteros de CP, FCC y SC con árido calizo a 28 días de edad curados en cámara húmeda a 20 °C

En la Figura 5.51 y Figura 5.52 se representa la resistencia a compresión (R_c) de los morteros con árido silíceo y calizo respectivamente de base CP y base CAA, frente al porcentaje de árido sustituido por FC. El comportamiento es muy similar a los resultados obtenidos en la R_f , donde los morteros con árido silíceo y FC con FCC como precursor, superan en resistencia a los morteros fabricados sólo con CP, llegando por ejemplo al mortero con un 25% de sustitución a un porcentaje superior del 17 % con respecto a su similar de CP. El otro grupo de morteros usando SC como precursor y 25% de sustitución de árido silíceo por FC no se aleja mucho de los valores alcanzados por sus similares de CP, ya que están a tan sólo -5% del valor de rendimiento.

Para el grupo de morteros con árido calizo, aunque en ninguno de los casos supera los valores alcanzados por sus similares fabricados con CP, siendo incluso algunos mayores que los fabricados con árido silíceo, este rendimiento no baja del -10 %, llegando por ejemplo a un -4 % en el mortero de SC como precursor y 25 % de sustitución de árido por FC.

Para los morteros sin árido, los morteros de CAA de FCC y SC obtienen resultados que superan al valor que alcanza el mortero de CP.

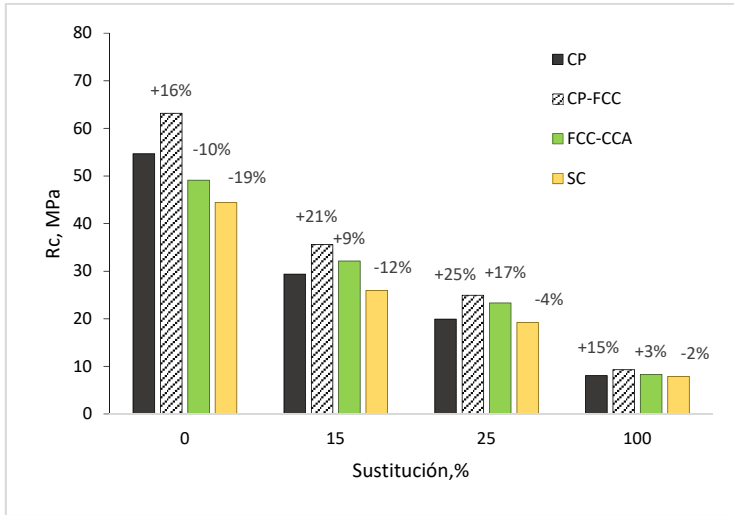


Figura 5.51 Rc. morteros de CP, FCC y SC con árido silíceo a 28 días de edad curados en cámara húmeda a 20 °C

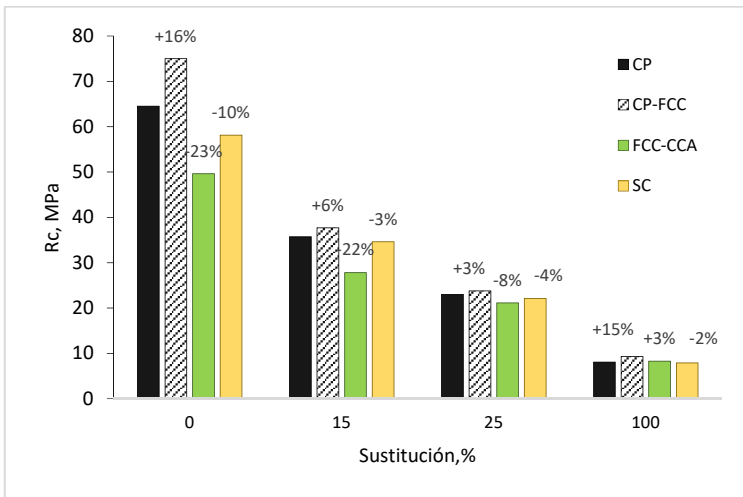


Figura 5.52 Rc. morteros de CP, FCC y SC con árido calizo a 28 días de edad curados en cámara húmeda a 20 °C

En general los resultados obtenidos para la R_c , en un 15% y 25% de sustitución de árido, alcanzan valores muy similares a sus equivalentes de CP, el intervalo de resistencias a compresión del grupo de muestras estudiadas con sustitución de FN varía entre 7.91 y 34.64 MPa, lo que incluso deja abierta la posibilidad a usos estructurales. Además, también mencionar que la resistencia a compresión mínima establecida para piezas de obra de fábrica es de 2.5 MPa en las de arcilla cocida y 5.0 MPa para las silíceas calcáreas (EN 771-1 y EN 771-2) [245], [246]. Esta consideración habilita a los morteros fabricados sin árido y usando CP, FCC o SC como material precursor, para la fabricación de piezas prefabricadas y piezas de obra de fábrica.

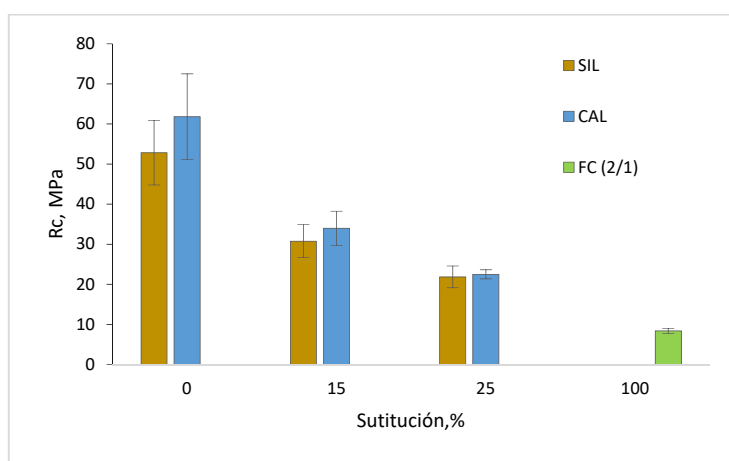


Figura 5.53 comparación de la R_c de los áridos silíceo y calizo – mortero sin árido

En la Figura 5.53 se representa la R_c promedio de todos los morteros a 28 días de edad (CP, CP 15%FCC, FCC y SC) con árido silíceo, calizo y sin árido frente al porcentaje de sustitución de árido por FC. Observamos que los morteros con árido calizo logran mayores valores de R_c frente a sus homólogos con árido silíceo; esto se debería probablemente a la diferencia de porosidad. Así los morteros con árido calizo son menos porosos (menor coeficiente de absorción) que su homólogo con árido silíceo, esto hace que los primeros presenten mayor densidad y por ende alcancen mejores R_c . Los morteros sin árido, aun siendo resistencias bajas con respecto a los morteros con árido,

logran valores muy cercanos a los 10 MPa por lo que podrían considerarse aptos para su uso como morteros de albañilería.

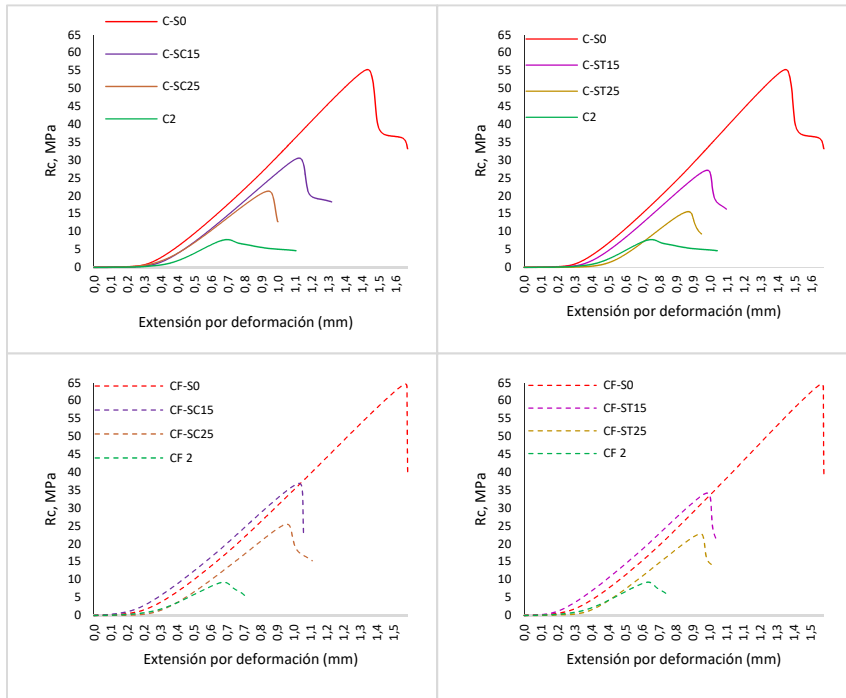


Figura 5.54 Curvas tensión-deformación de morteros de CP y CP 15% FCC usando árido silíceo. (figuras a la izquierda morteros con FC, figuras a la derecha morteros con FT) (ver códigos en la Tabla 4.18, Tabla 4.19, Tabla 4.20, Tabla 4.21)

En la Figura 5.54 (árido silíceo) y Figura 5.55 (árido calizo), se analiza las curvas de esfuerzo a compresión frente a la extensión por deformación, de los morteros de CP y morteros de CP con 15 % de sustitución de CP por FCC, donde observamos una disminución de la pendiente posterior a la máxima tensión, lo que indica una pérdida gradual de fragilidad a medida que aumenta la cantidad de FN.

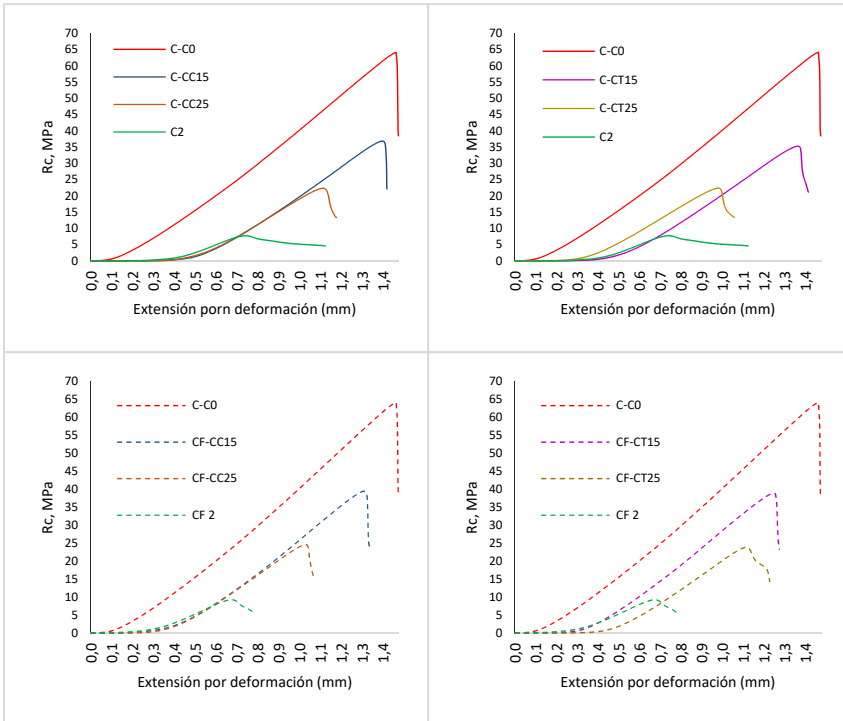


Figura 5.55 Curvas tensión-deformación de morteros de CP y CP 15% FCC usando árido calizo. (figuras a la izquierda morteros con FC, figuras a la derecha morteros con FT) (ver códigos en la Tabla 4.18, Tabla 4.19, Tabla 4.20, Tabla 4.21)

En la Figura 5.56 y Figura 5.57, se analiza las curvas de esfuerzo a compresión frente a la extensión por deformación, de los morteros de CAA usando como precursores FCC y SC respectivamente, donde vemos que el comportamiento es similar, a los morteros de CP, es decir, que también esa pérdida de fragilidad aumenta a medida que el porcentaje de sustitución de FC es mayor

Utilización de residuos de Neumáticos Fuera de Uso en conglomerantes con base cemento portland y de activación alcalina para uso en prefabricados de bajo coste económico y medioambiental

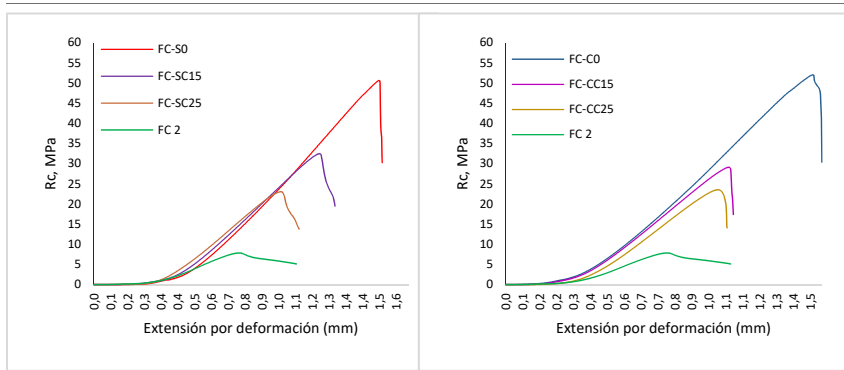


Figura 5.56 Curvas tensión-deformación de morteros de FCC usando árido silíceo (figura a la izquierda) y árido calizo (figuras a la derecha) con FC (ver códigos en la Tabla 4.22,

Tabla 4.23)

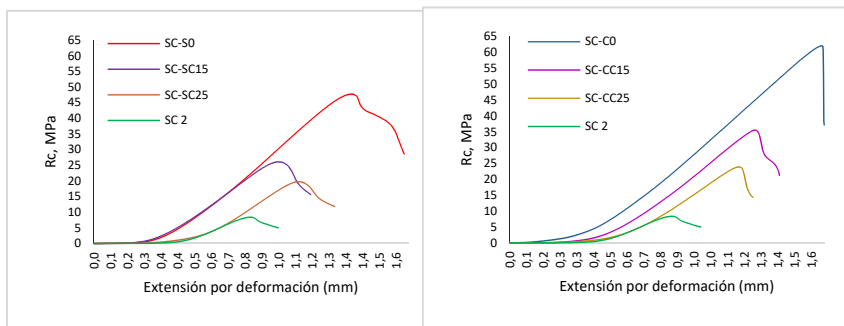


Figura 5.57 Curvas tensión-deformación de morteros de SC usando árido silíceo (figura a la izquierda) y árido calizo (figuras a la derecha) con FC (ver códigos en la Tabla 4.26, Tabla 4.27)

La disminución del módulo elástico va asociada a una disminución de la rigidez, en la Tabla 5.7 observamos los resultados de flexibilidad ultima al 60% de la carga máxima a compresión de los 4 grupos de morteros (CP, CP-15%FCC, FCC y SC); tras la lectura de los datos podemos concluir que acrecienta la flexibilidad del mortero a medida que aumenta la sustitución de árido (SIL - CAL) por FN. Este análisis de los valores de flexibilidad a compresión resulta de dividir la deformación en un punto de la curva tensión-extensión (D) entre su correspondiente valor de esfuerzo (Rc).[50]

$$Cu = \frac{Du}{Rcu} \tag{5.1}$$

Tabla 5.7 Flexibilidad última de morteros

Flexibilidad última* ($10^{-3} \text{ mm}^3/\text{J}$)					
% Sust.	CP	CP 15%FCC	FCC	SC	
Silíceo	0	50,80	40,71	51,04	58,06
	15	69,63	47,58	66,30	74,09
	25	77,32	71,47	79,40	108,67
Calizo	0	37,10	37,10	50,29	43,84
	15	62,07	54,54	63,05	65,42
	25	84,63	70,09	75,95	87,43
100	233,05	135,29	239,27	195,92	

(*) Ultima, al 60% de la carga máxima a compresión.

En la Figura 5.58 se muestra como la capacidad de deformación aumenta al incrementar el contenido de FN. La flexibilidad aumenta con el contenido de fibra de neumático, tendiendo a converger los valores de flexibilidad para la cantidad del 100% de FN para los mayores niveles de sustitución de árido por fibra.

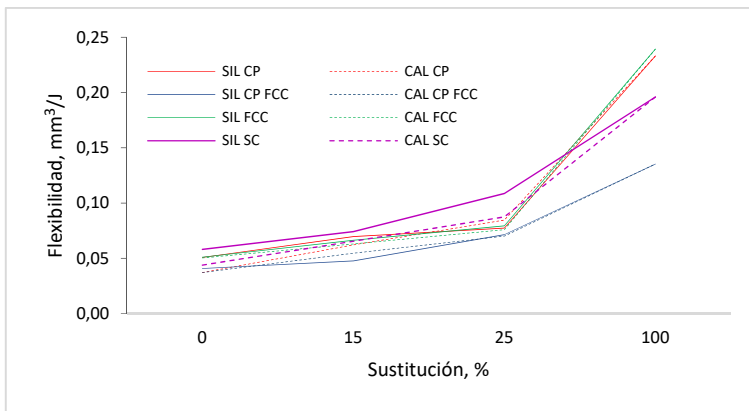


Figura 5.58 Flexibilidad al 60% de la carga máxima en función del % de FC

En la Figura 5.59 se representa la resistencia a compresión R_c a 28 días de edad frente a la densidad aparente en seco, de los morteros de CP y CAA, podemos ver que la R_c disminuye al aumentar la cantidad de FN lo cual se traduce en una mayor presencia de porosidad del materiales, ya sea en base CP o CAA [77]. La relación agua/precursor también influye en la relación R_c/Dap , ya que los morteros de FCC (línea verde) que tiene una relación de 0,6 son los que se ubican en la parte superior y los morteros de SC (línea amarilla) con una relación 0,4 se ubican en la parte inferior, este comportamiento sucede para los dos áridos.

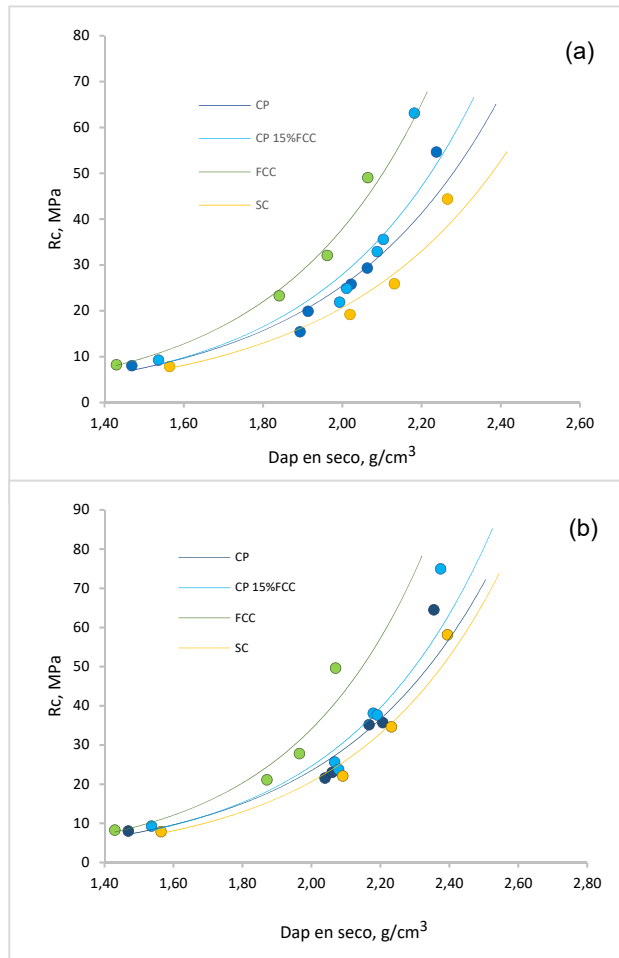


Figura 5.59 R_c frente a la Dap de los morteros con árido silíceo (a) y árido calizo (b)

Conclusiones Resistencias mecánicas

Para las 4 series de morteros trabajados, tanto con base CP (CP y CP 15%FCC) y base CAA (FCC y SC) la resistencia a flexotracción como a compresión se redujeron de forma considerable al sustituir árido por FN. Y de la misma forma en los morteros sin árido (100% FC) las resistencias sufrieron un detrimento a medida que la relación conglomerante/FC se reducía.

La sustitución del 15% de CP por FCC en los morteros de CP optimiza sus propiedades mecánicas (flexotracción – compresión); tanto en 15 % como en 25% de sustitución de árido por FN.

Los morteros de FCC con árido silíceo y 15 % y 25 % de sustitución de árido por FC alcanzan valores de R_c superiores a los morteros de CP, sus análogos de árido calizo llegan hasta el 90% de la resistencia de los morteros de CP y árido calizo.

Para los morteros de SC como precursor, el comportamiento es similar a los morteros de FCC, llegando hasta un 97% de la resistencia a compresión de sus homólogos de CP.

Para los morteros sin árido, los morteros de activación alcalina de FCC y SC obtienen resultados similares a los valores que alcanzan los morteros de CP.

En general los resultados obtenidos para la R_c , en un 15% y 25% de sustitución de árido, alcanzan valores muy similares a sus equivalentes de CP, el intervalo de resistencias a compresión del grupo de muestras estudiadas con sustitución de FN varía entre 7.91 y 34.64 MPa, lo que abre la posibilidad a usos estructurales. Además, mencionar que la resistencia mínima establecida para piezas de obra de fábrica es de 2.5 MPa en las de arcilla cocida y 5.0 MPa para las silicocalcáreas

(EN 771-1 y EN 771-2) Esta consideración habilita a los morteros fabricados sin árido y usando CP, FCC o SC como material precursor, para la fabricación de piezas prefabricadas y piezas de obra de fábrica.

5.4 Estudios microestructurales mediante microscopía electrónica - FESEM

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en los estudios de diversos fragmentos de morteros analizados por microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM).

Para ello se seleccionaron como porcentajes de estudio el 25% de sustitución de árido silíceo o calizo por FC, así como las matrices sin áridos naturales (sólo fibra de camión FC). Todas las muestras analizadas están tomadas a la edad de 28 días y curado en cámara húmeda a 20 °C.

Asimismo, se mostrarán imágenes obtenidas tanto por el detector de electrones secundarios (SE2) como imágenes obtenidas por el detector de electrones retrodispersados (BSE).

La bibliografía es escasa cuando se habla sobre la microestructura de morteros (CP, CAA) que incorporan caucho como agregado. Estos estudios corroboran la poca adherencia existente entre la matriz y la superficie del caucho, así como la presencia de porosidad tanto en la matriz como alrededor de la partícula de caucho. [26][25],[85],[183]

5.4.1 Microestructura de morteros de CP

Algunos autores señalan la presencia de poros alrededor de las partículas de caucho respondiendo al carácter no polar del mismo, lo que produce la formación de poros entre la fibra y la matriz. [18],[25],[79],[85], [115],[183].

En las micrografías realizadas en nuestros especímenes no se ha observado una porosidad excesiva alrededor de la fibra, pero sí se observa algún poro de gran tamaño que se puede deber a dicho fenómeno o simplemente a la presencia de poros propios de la matriz. En la Figura 5.60 se muestra una micrografía de un mortero con cemento portland y un 15% de sustitución de cemento por FCC empleando árido calizo y un 25% de fibra de camión donde observamos la presencia de poros.

La característica principal que se observa en todas las matrices tanto de árido silíceo como calizo, así como con presencia o no de FCC, es la falta de adherencia entre la fibra y la matriz. En la Figura 5.61 se muestran diversas micrografías a distintos aumentos donde se pone de manifiesto la falta de adherencia, tanto en matriz con árido silíceo como con 100% de FC.

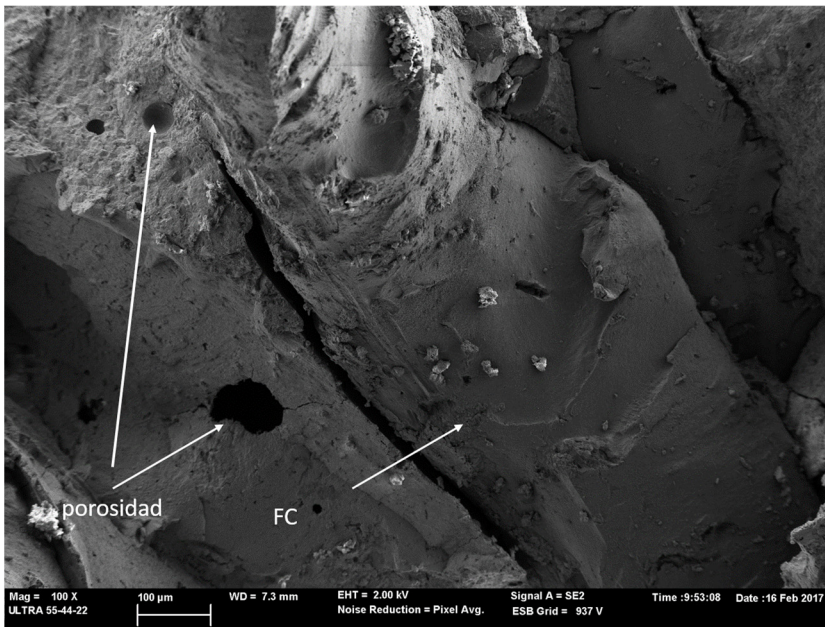


Figura 5.60 Micrografía de mortero con árido calizo, CP F15%FCC con un 25% de FC (100 µm)

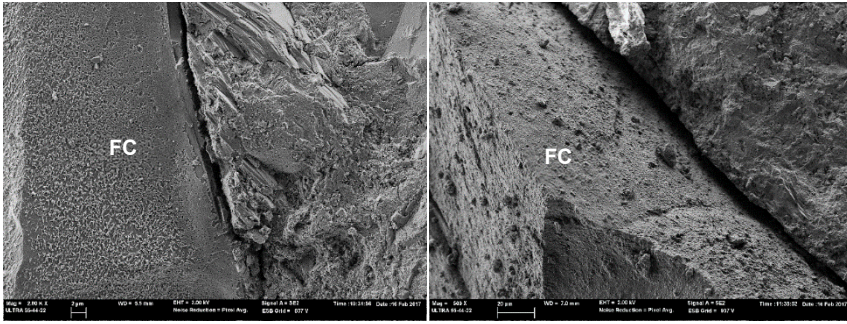


Figura 5.61 Micrografías de CP, mortero de CP con 25% de sustitución de árido silíceo por FC. (2 μm izquierda) – mortero de CP sin árido (20 μm derecha)

Las imágenes empleando el detector de electrones secundarios pone de manifiesto esta falta de adherencia, en cambio cuando se utiliza el detector de electrones retrodispersados somos capaces de distinguir la fibra de la matriz, pero no se hace tan evidente esta falta de adherencia. En la Figura 5.62 (izquierda) se muestra en la micrografía a la imagen por electrones secundarios y la derecha la imagen por electrones retrodispersados.

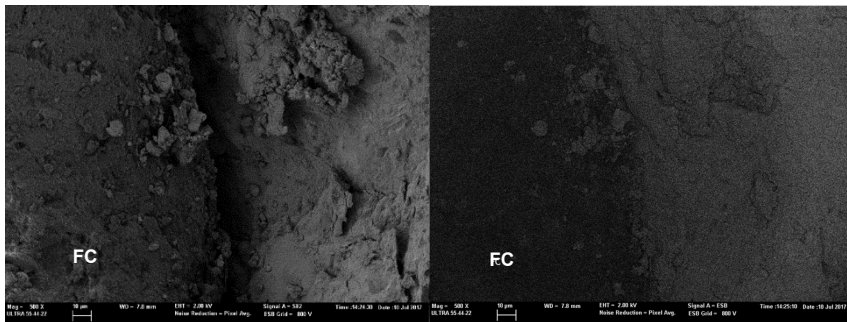


Figura 5.62 Micrografías (10 μm) de mortero de CP con 25% de sustitución de árido silíceo por FC. Izquierda Imagen con SE, derecha Imagen con BSE.

Por último, cabe indicar que la presencia de la FC no hace que varíen los productos de hidratación del cemento portland. En la Figura 5.63 se muestra a modo de ejemplo la presencia de silicoaluminatos cálcicos hidratados en la pasta con cemento y

sin árido que por lo general se generan en la interfase y los vacíos generados por aire. [240],[15],[50],[247]

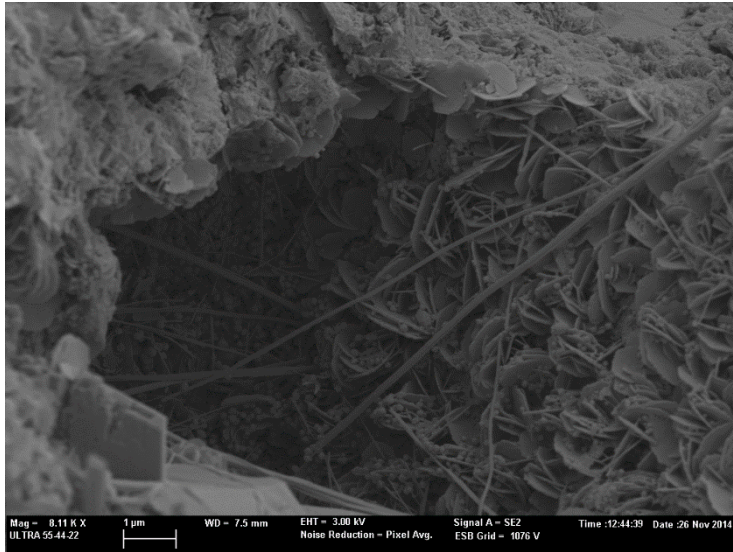


Figura 5.63 Micrografía de mortero con cemento y 100% FC

Algunos autores comentan [15],[28],[72][101]. sobre tratamientos previos hechos a la partícula de caucho o a su superficie, logrando escasas mejoras o irrelevantes a considerar.

5.4.2 Microestructura de morteros de activación alcalina (FCC – SC)

La bibliografía es escasa dentro del trabajo de morteros de cemento activado alcalinamente con adición de partículas de caucho provenientes de NFU [178]–[185] y es aún más escasa sobre análisis de microestructura de morteros de activación alcalina y partículas de caucho o fibras de neumático provenientes de NFU [14]

5.4.2.1 Microestructura de morteros de activación alcalina usando como precursor FCC.

En el caso de morteros de activación alcalina no se tiene constancia de estudios microestructurales de este tipo de matriz con las fibras de camión. En las micrografías seleccionadas se observa que la fibra de caucho no tiene tampoco buena adherencia con este tipo de matrices, puesto que se observa la misma zona de separación que la obtenida en los morteros con cemento portland. En este tipo de morteros si se observa mayor presencia de poros en la matriz, pero no se considera que se deba a la presencia de la fibra, ya que en la bibliografía consultada sobre este tipo de matrices donde se tiene únicamente pasta sin presencia de árido ya se observa la presencia de poros de diversos tamaños [13]. Por lo tanto, la porosidad sería intrínseca a la matriz y no debida a la presencia de fibra.

En la Figura 5.64 se observa la falta de adherencia entre la FC y la matriz, tanto en las muestras con árido calizo como en el mortero sin árido

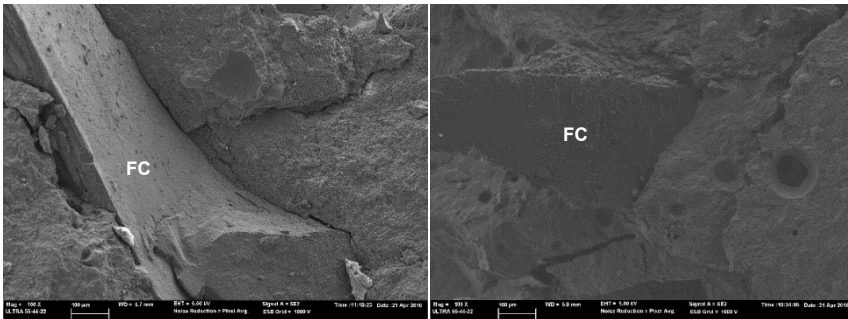


Figura 5.64 Micrografías de morteros de FCC con 25% de sustitución de árido calizo por FC (izquierda) y mortero de FCC sin árido (derecha)

Como ya sucedía en el caso del cemento portland, los productos de reacción de geopolimerización son los mismos en los morteros con presencia o sin presencia de fibra de camión tal y

como se observa en la micrografía de la Figura 5.65. En ella se muestra el gel N-A-S-H típico de este tipo de matrices

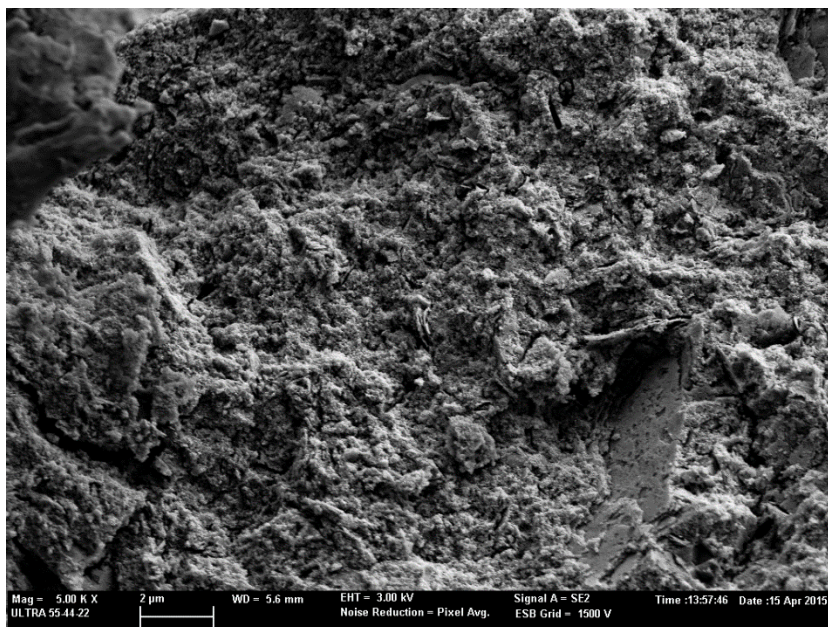


Figura 5.65 Micrografía del mortero geopolimérico FCC, con 15 % de sustitución de árido silíceo por FC

5.4.2.2 Microestructura de morteros de activación alcalina usando como precursor SC

Por último, se han estudiado las matrices con escoria y en ellas destacaríamos dos puntos importantes. Por un lado, no existe una mejora en la adherencia matriz/FC por utilizar este tipo de matriz, pero sí cabe indicar que la porosidad de esta matriz es inferior a la análoga con FCC. Esto no se debe a la presencia o no de fibra sino a la naturaleza de la matriz geopolimérica

En la Figura 5.66 se muestran dos micrografías donde se observa la mala adherencia entre pasta y matriz.

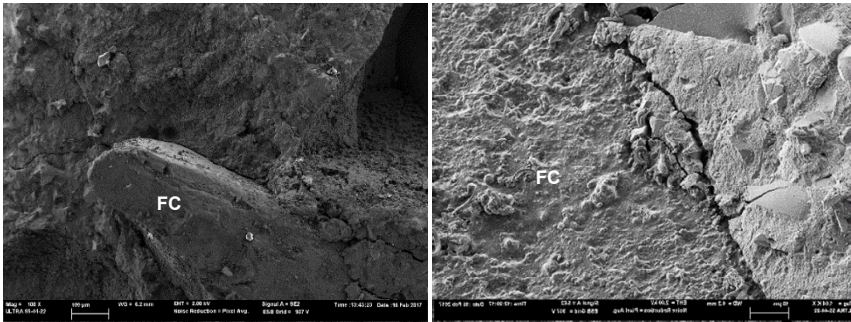


Figura 5.66 Micrografías de morteros de SC con 25 % de sustitución de árido calizo por FC (izquierda) y mortero de SC sin árido (derecha)

A modo de ejemplo se muestra en la Figura 5.67 una micrografía de la matriz, donde se observan los mismos productos de geopolimerización que se obtendrían en una pasta de escoria sin presencia de fibra de camión.

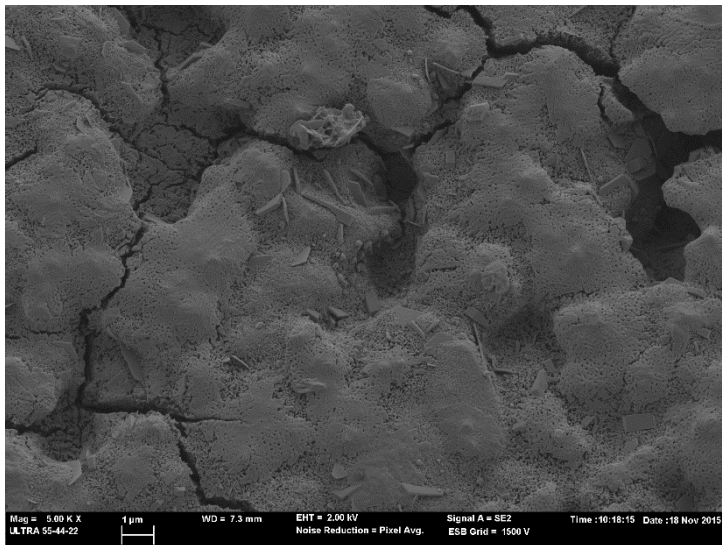


Figura 5.67 Micrografía de mortero con SC sin árido

Conclusiones Microestructura SEM -FESEM

El uso de FN en morteros con base CP o de CAA muestra un comportamiento similar en ambos casos. Se constata que, por las características físicas y químicas del caucho, tiende a repeler a la matriz y no crear una buena adherencia entre ambos, lo que repercute directamente en las resistencias mecánicas del mortero.

Los morteros de CP con una sustitución de CP por FCC en un 15% aparentemente mejoraría la adherencia caucho matriz, pero luego de ver las micrografías y sus respectivos espectros, notamos que, lo que se mejora es la reducción de poros formados alrededor de las partículas de FN probablemente como consecuencia de las propiedades puzolánicas del FCC, pero no así la adherencia con la matriz. Por este motivo se podría explicar que los morteros con de CP y 15% de sustitución de CP por FCC alcanzan mejores resistencias mecánicas.

Para las muestras de CAA el comportamiento es similar a los morteros de CP. Se mantiene presente la red de poros, aunque en mayor o menor proporción de acuerdo a la relación agua/precursor. Se mantiene la tendencia a una adherencia deficiente entre la partícula de caucho y la matriz es constante.

5.5 Velocidad de ultrasonido

Se han realizado unas experiencias para el estudio de la velocidad de ultrasonido en las distintas matrices. Los resultados se muestran a continuación.

En la Figura 5.68 y Figura 5.69 se representan la velocidad de onda longitudinal, frente al porcentaje de sustitución de árido por FC, donde se muestra las velocidades de ondas longitudinales

de las cuatro series de morteros estudiados. Al observar los morteros con árido y un porcentaje de sustitución de árido por FC, vemos que las velocidades disminuyen a medida que el porcentaje de sustitución de árido por FC aumenta. Esta disminución sería debido al aumento de las discontinuidades de la matriz por la introducción de las fibras, acompañadas de la disminución de la densidad, que reduciría la velocidad de propagación de las ondas.

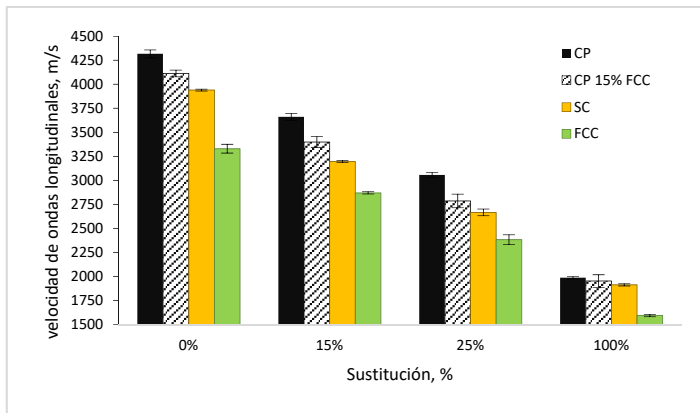


Figura 5.68 Velocidad de ondas longitudinales de ultrasonido en morteros con árido silíceo

Investigaciones previas destacan el potencial de morteros y hormigones con caucho para atenuar vibraciones y absorber sonido [77],[107]. Khaloo et al. Efectuaron un análisis de onda ultrasónica para investigar la absorción de sonido y el módulo de elasticidad dinámico. Los resultados demostraron que el material es adecuado para absorber sonido y disipar la energía afín a las vibraciones [19], [248],[93],[28].

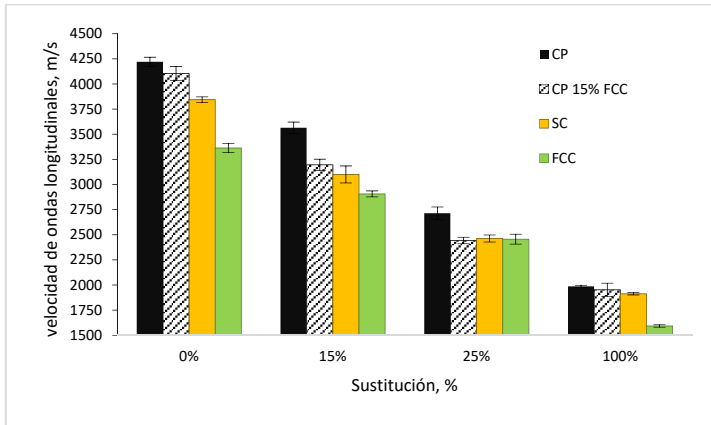


Figura 5.69 Velocidad de ondas longitudinales de ultrasonido en morteros con árido calizo

En estudios de hormigones que añaden diferentes granulometrías de residuos de caucho con tamaños de 0.29 y 0.59 mm, se concluye que mayores valores de atenuación se observan en las mezclas donde el caucho tiene tamaño de partícula más pequeñas, ya que son más porosas, hecho que influye directamente en la propagación de los ultrasonidos, con una atenuación mayor y una menor velocidad de propagación [104].

En la Figura 5.70 se representa la velocidad de onda longitudinal frente a la relación de CP/FC o CAA/FC, en el caso de los morteros sin árido la velocidad disminuye cuando la relación CP/FN o material precursor/FC disminuye. En este caso influye también la diferencia de densidad de los materiales, ya que el CP tiene mayor densidad que el FCC, y SC (valores descritos en la Tabla 4.17)

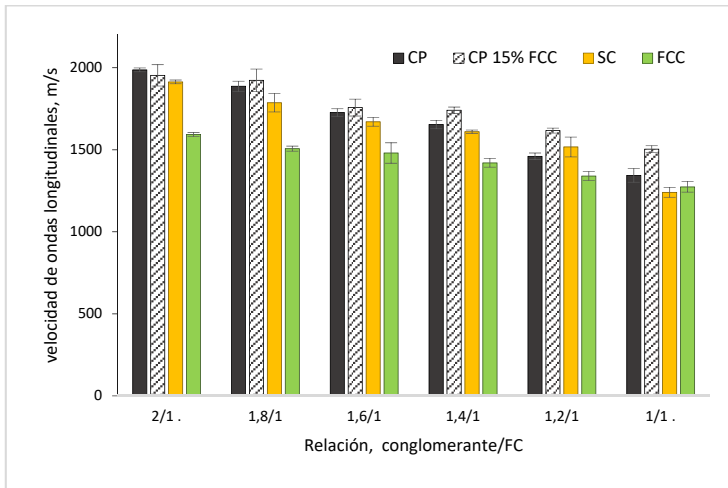


Figura 5.70 Velocidad de ondas longitudinales de ultrasonido en morteros sin árido

Dentro de los 4 grupos, los morteros de activación alcalina de FCC son los que alcanzan valores menores de velocidad, llegando por ejemplo a velocidades de 2383 m/s en 25 % de sustitución de árido, o 1593 m/s en 100% de FC. Una explicación a estos resultados que se suma a la diferencia de densidad de cada material es que en estos morteros la relación agua/FCC es 0,6, entonces la presencia de agua hace que haya una mayor presencia de poros y por ende mayor discontinuidad en el material.

En la Figura 5.71 se representa la velocidad de onda longitudinal a través de los morteros de CP y CAA frente al porcentaje de sustitución de árido por FC. Se ha calculado un valor promedio de los morteros con base cemento portland (CP CP15%FCC) (columna gris) y con base CAA (FCC y SC) (columna verde) Se observa claramente que los morteros con base CP tiene mayores velocidades frente a sus homólogos de CAA, como ya dijimos, este comportamiento es probablemente debido a la diferencia de densidad entre el CP y los otros precursores (FCC y SC) esto indicaría que los morteros geopoliméricos tendrían mejores propiedades al momento de repeler el sonido y la vibración.

5 Resultados y discusión

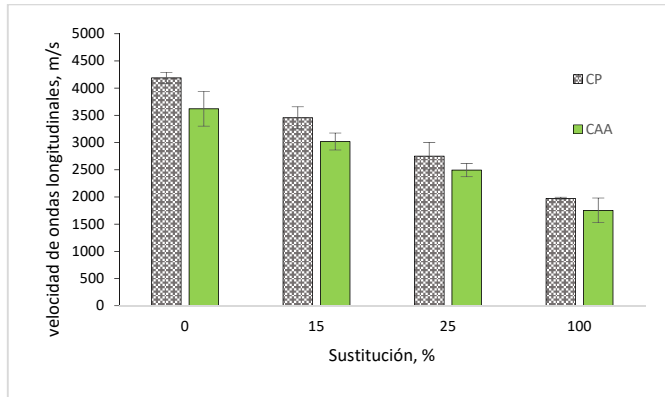


Figura 5.71 Velocidad de onda longitudinal promedio de los morteros de base CP y CAA

Podemos observar en la Figura 5.72 donde se representa la densidad aparente en seco frente a la velocidad de onda longitudinal de las 4 series de morteros estudiados. Los resultados ponen de manifiesto un aumento lineal de la velocidad conforme aumenta la densidad.

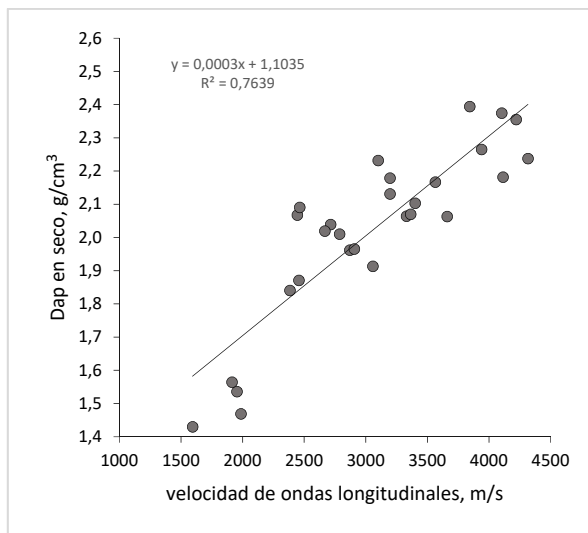


Figura 5.72 Correlación de la densidad aparente en seco frente a la velocidad de onda longitudinal

Por otra parte, la velocidad de ondas longitudinales que es sensible a las variaciones que se producen en el material guarda correlación con la resistencia a compresión, siendo un indicador de la cantidad de discontinuidades en el material [240],[213] tal como se aprecia en la Figura 5.73. donde se representa la resistencia a compresión frente a la velocidad de onda longitudinal de los morteros estudiados.

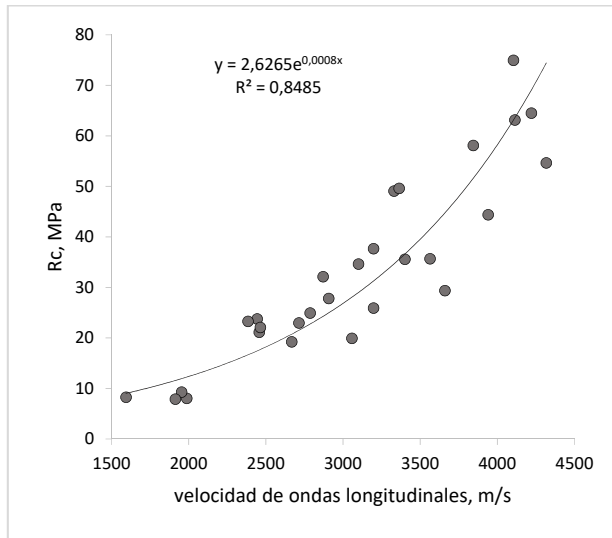


Figura 5.73 Resistencia a compresión frente a la velocidad de onda longitudinal

Conclusiones de los ensayos de velocidad de ultrasonido

Para todas las matrices estudiadas se observa una disminución de la velocidad de ultrasonido conforme aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FC. En los morteros sin árido (100%FC) también se observó una disminución de la velocidad de ultrasonido conforme disminuye la relación conglomerante/FC.

Las matrices geopoliméricas representaron en todos casos valores de velocidad de ultrasonido inferiores a las matrices de CP.

Existe una correlación entre la densidad aparente en seco y la velocidad de ultrasonido. Así como entre la resistencia a compresión y la velocidad ultrasónica siendo esta correlación lineal en el primero de los casos

5.5.1 Conductividad térmica

Se han analizado todas las dosificaciones para elaborar probetas de 40x40x160 mm³. Se han ensayado cada una de ellas para obtener tres lecturas por muestra. El procedimiento de medida de la conductividad térmica se presenta en el capítulo 4.2.15. Son varios los autores que estudian el comportamiento de la conductividad térmica en morteros y hormigones de CP con incorporación de caucho, llegando a conclusiones similares que en general se resume en que la conductividad térmica disminuye al aumentar la cantidad de partículas de caucho. [112],[109],[110],[15], [111],[108]

Tabla 5.8 Valores de conductividad térmica obtenidos en ensayo

		CP	CP 15% FCC	FCC	SC
PORCENTAJE		conductividad térmica λ (W / mK)	conductividad térmica λ (W / mK)	conductividad térmica λ (W / mK)	conductividad térmica λ (W / mK)
SILÍCEO	0%	1,81 ± 0,01	1,60 ± 0,11	0,97 ± 0,03	1,23 ± 0,05
	15%	1,59 ± 0,07	1,50 ± 0,08	0,95 ± 0,10	1,07 ± 0,06
	25%	1,50 ± 0,08	1,36 ± 0,15	0,93 ± 0,04	0,96 ± 0,06
CALIZO	0%	1,70 ± 0,02	1,49 ± 0,05	0,96 ± 0,03	1,12 ± 0,01
	15%	1,39 ± 0,10	1,21 ± 0,11	0,88 ± 0,02	1,05 ± 0,04
	25%	1,19 ± 0,01	1,17 ± 0,13	0,85 ± 0,05	0,91 ± 0,05
RELACION					
FN	2/1 .	1,14 ± 0,04	0,94 ± 0,08	0,64 ± 0,07	0,78 ± 0,07
	1,8/1	1,11 ± 0,04	0,94 ± 0,16	0,59 ± 0,04	0,74 ± 0,05
	1,6/1	1,05 ± 0,07	0,90 ± 0,20	0,52 ± 0,10	0,68 ± 0,06
	1,4/1	0,97 ± 0,07	0,83 ± 0,04	0,52 ± 0,03	0,65 ± 0,03
	1,2/1	0,86 ± 0,06	0,81 ± 0,03	0,50 ± 0,07	0,64 ± 0,03
	1/1 .	0,81 ± 0,03	0,78 ± 0,10	0,47 ± 0,04	0,63 ± 0,02

En la Figura 5.74 y Figura 5.75 el comportamiento es similar, los valores de conductividad disminuyen a medida que se incrementa el porcentaje de FC en la dosificación. Los valores de conductividad térmica se presentan en la Figura 5.74. la cual nos muestra los valores de conductividad térmica de los 4 grupos estudiados. Vemos que los valores de conductividad térmica de los morteros de CP se encuentran dentro de los valores de hormigones y morteros convencionales de CP que están comprendidos entre 2,50 y 1,15 W/mK [239]. Si bien la sustitución del 15% de CP por FCC ayuda a reducir esos valores de conductividad, estos valores se siguen manteniendo dentro de esa franja de morteros convencionales. Los morteros de activación alcalina son los que logran mejores valores con respecto a sus homólogos de CP ya que en algunos casos alcanzan valores muy cercanos a materiales plásticos como el polietileno alta densidad (HDPE) que tiene una conductividad de 0,50 W / mK, o morteros con áridos ligeros con valores que alcanzan 0,41 W / mK.

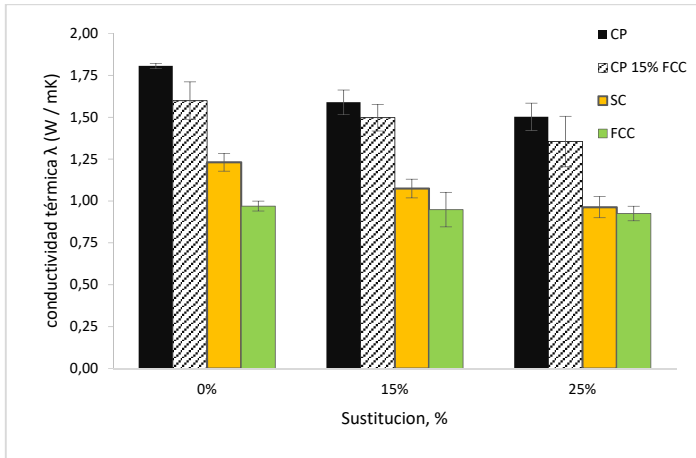


Figura 5.74 Valores de conductividad térmica de morteros con árido silíceo

Los morteros con árido calizo alcanzan valores más bajos de conductividad térmica con respecto a sus homólogos con árido silíceo, lo que podría explicarse teniendo en cuenta la diferencia de conductividad térmica entre ambos áridos, de 1,10 a 2,30

W/mK para el árido calizo y 2,45 a 5,20 W/mK para el árido silíceo y la FN, que varía de 0.25 a 0.50 W/mK. [239],[111].

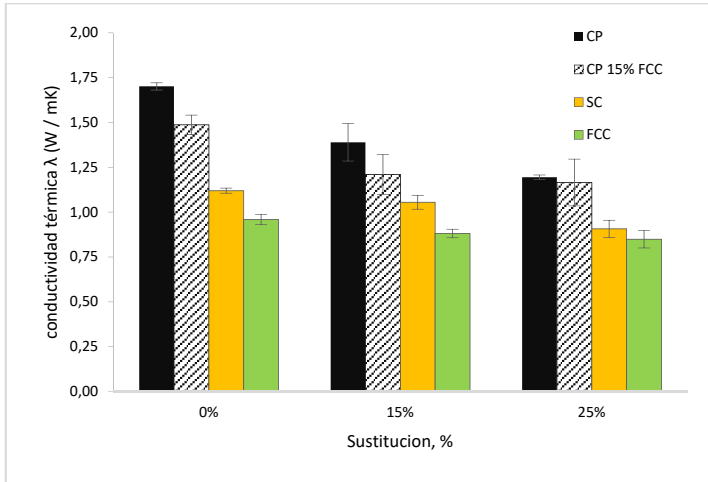


Figura 5.75 Valores de conductividad térmica de morteros con árido calizo

Sin embargo, la conductividad térmica del material no depende solamente de la conductividad térmica del árido, sino también de su red de poros, del contenido de humedad, del grado de cristalización, de su estructura celular, etc. [110],[249], estas variables están relacionadas con el valor de densidad del material, que en el caso de los morteros sin árido afecta directamente en el valor de conductividad térmica.

En la Figura 5.76 se representa la media de la conductividad térmica de los morteros de base CP y CAA frente al porcentaje de sustitución de árido por FC, donde luego de ver las variables que influyen en la conductividad térmica del material, podemos decir que los morteros de base CAA alcanzan mejores valores de conductividad térmica que sus homólogos de CP

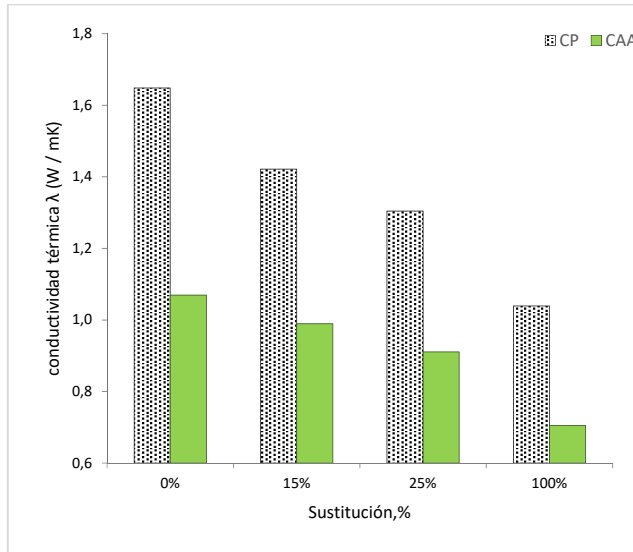


Figura 5.76 Conductividad térmica de los morteros con base CP y CAA

En la Figura 5.77 se representa los valores de conductividad térmica de los morteros sin árido frente a las relaciones de conglomerante/FC, los resultados ponen de manifiesto una disminución de la conductividad térmica conforme se reduce la relación conglomerante/FC, para todos los tipos de morteros estudiados se constata diferencias significativas entre los morteros con matriz cemento portland y los morteros con matriz geopolimérica. Para tratar de explicar estas diferencias se ha representado la conductividad térmica frente a la densidad aparente en seco (Figura 5.78), los resultados indican un aumento de la conductividad térmica conforme aumenta la densidad, pero tal vez lo más interesante es que para valores similares de densidad, las matrices de CAA presentan una conductividad térmica netamente inferior a las matrices de CP.

En definitiva, se concluye que la adición de partículas de caucho a morteros de CP y cemento activado alcalinamente como agregado reduce su conductividad térmica y por ende se trata de un material recomendable para ahorrar energía en aplicaciones para la edificación

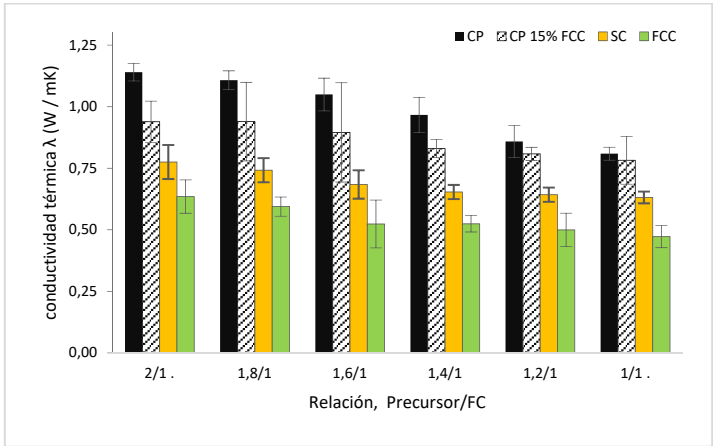


Figura 5.77 Valores de conductividad térmica de morteros sin árido

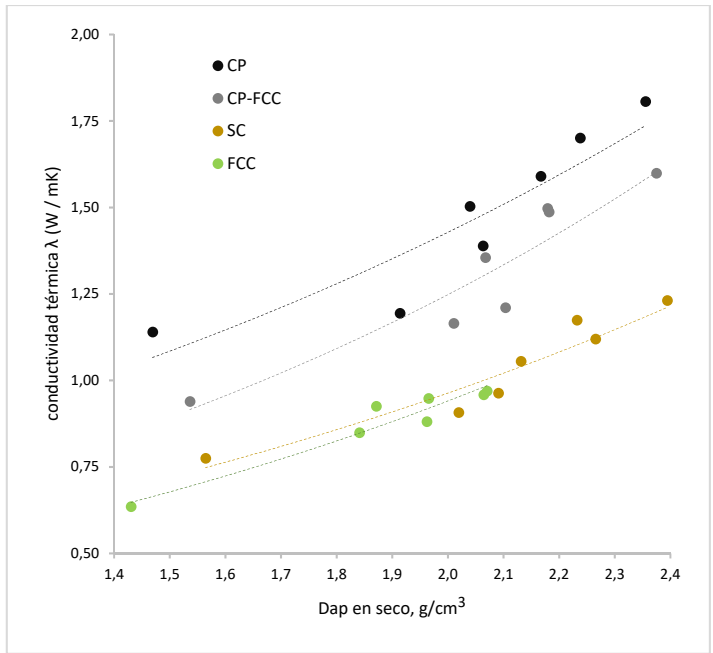


Figura 5.78 Correlación de la conductividad térmica frente a densidad aparente en seco

Conclusiones de los ensayos de conductividad térmica.

Se observa una disminución de la conductividad térmica conforme incrementa el porcentaje de sustitución de árido por FC. Para morteros sin árido (100%FC) se constata una disminución de la conductividad térmica conforme disminuye la relación conglomerante/FC (aumento relativo).

Las matrices de CAA presentan valores de conductividad térmica netamente inferiores para el mismo porcentaje de sustitución de árido por fibra en los morteros de CP

Los resultados de densidad aparente en seco indican de forma clara que, para valores análogos de densidad, los morteros con base CAA presentan una conductividad térmica inferior a los morteros con base CP.

En general para los 4 tipos de morteros estudiados (CP, CP 15%FCC, FCC y SC), a medida que el porcentaje de sustitución de árido por FC se incrementa, disminuye la conductividad térmica de los morteros, alcanzando valores de conductividad térmica inferiores a los morteros y hormigones convencionales

5.6 Termografía

Los resultados del análisis termográfico de los morteros de CP y CAA se muestran en la Tabla 5.9, donde se representa las temperaturas finales a los 30 minutos de medición cuando en el interior de la caja se llega a los 80°C y a los 160°C. Se pone de manifiesto que el incremento de la FC en el mortero disminuye el salto térmico entre la temperatura interior de la caja y la superficie exterior de la placa.

Las temperaturas finales a los 30 minutos de medición y a los 80°C son muy similares entre los dos árido (SIL y CAL) y también entre los precursores (FCC y SC) y el CP, pero se muestra una

diferencia considerable cuando se mide a 160°C, donde los morteros con árido calizo marcan una diferencia frente a sus homólogos de árido silíceo. Son los morteros sin árido los que logran una diferencia de temperatura final, al tener una media de 14 °C y 10 °C con respecto a los morteros control de árido silíceo y calizo respectivamente. Esta similitud de temperaturas para las diferentes matrices cementantes es muy positiva a la hora de valorar las materias primas, ya que, siendo residuos industriales logran tener un comportamiento similar al CP.

Tabla 5.9 Temperaturas finales a las temperaturas de 80°C y 160 °C de los morteros de CP y CAA

Temperatura final a los 80 °C									
	Silíceo			Calizo			Sin árido		
	0 %	15 %	25 %	0 %	15 %	25 %	2/1.	1,4/1.	1/1.
CP	47,3	46,5	46,8	45,9	45,7	45,8	45,2	44,1	43,8
CPFCC	46,4	45,9	45,6	44,8	44,6	44,8	44,0	43,2	42,4
FCC	46,7	46,5	46,3	46,6	46,1	44,6	43,4	43,3	43,3
SC	47,6	46,8	46,4	46,3	44,0	43,6	43,0	42,7	42,1
Temperatura final a los 160 °C									
CP	86,4	82,1	79,4	79,2	78,4	77,2	72,6	72,2	71,4
CPFCC	82,0	81,7	80,1	77,2	77,0	76,5	67,9	66,8	65,0
FCC	84,4	82,2	81,5	78,1	78,0	74,8	69,8	68,8	66,3
SC	79,3	76,7	76,1	78,7	75,3	74,0	73,2	71,4	69,4

En la Figura 5.79 y Figura 5.80 se representan las temperaturas finales alcanzadas en promedio, en la superficie exterior de la placa por los morteros de CP y CAA, frente al porcentaje de sustitución de árido (SIL o CAL) por FC, donde se pone de manifiesto que los morteros de CAA, alcanzan temperaturas menores en comparación a los morteros de base CP.

5 Resultados y discusión

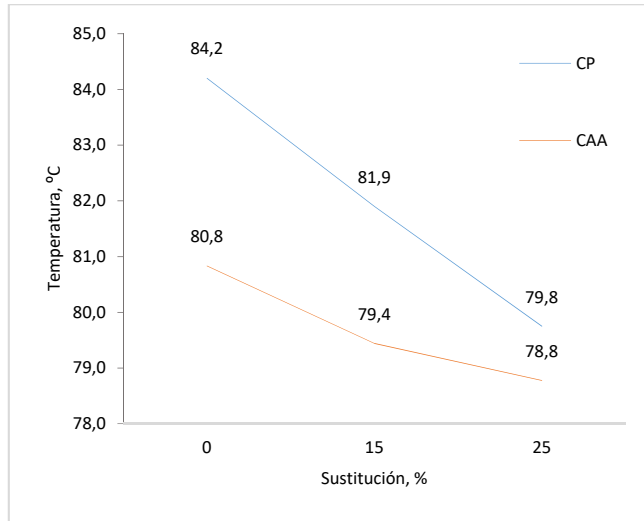


Figura 5.79 Promedio de la temperatura final alcanzada en la superficie exterior de la placa, de los morteros de CP y CAA con árido silíceo a 160 °C

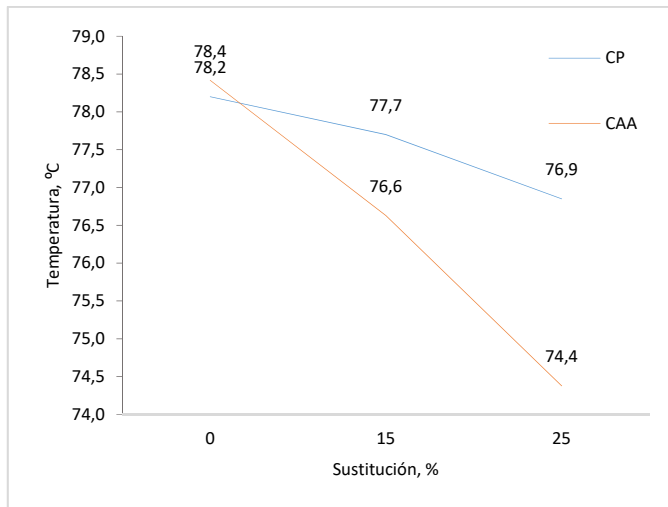


Figura 5.80 Promedio de la temperatura final alcanzada en la superficie exterior de la placa, de los morteros de CP y CAA con árido calizo a 160 °C

Conclusiones de los ensayos de termografía

Los ensayos de termografía hacen notar que, para un mismo tiempo de exposición, la temperatura en la cara exterior de la placa es menor a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de árido por FC.

Las temperaturas finales obtenidas muestran que el árido calizo alcanza ligeramente temperaturas más bajas frente a sus homólogos de árido silíceo. Siendo los morteros sin árido (100% FC) los que alcanzan temperaturas más bajas pasado los 30 minutos de medición

El comportamiento de los morteros de CAA con sustitución de árido por FC, en promedio es mejor respecto a los morteros de CP.

5.7 Tejas – Esfuerzo de flexión.

Las tejas se ensayaron según el apartado 5.6 de acuerdo a la norma EN 491: 2011.[233], [236]. En la normativa se indica que el valor mínimo de resistencia a flexión transversal F_{min} (N) no debe ser menor que 1400 N. Ya que nuestras tejas tienen una altura de onda comprendida entre $20 \text{ mm} \geq d \geq 5 \text{ mm}$ y una anchura efectiva o de cubrición de teja (C_w) en mm, $\geq 300 \text{ mm}$, corresponde este valor de resistencia. Como se ha indicado anteriormente entre los intereses de esta tesis doctoral, está en hacer accesible materiales y tecnologías a los sectores de menores recursos de los países en desarrollo, por este motivo además de la normativa europea se incluye las recomendaciones de la red Ecosur de amplia implantación en América latina, documento técnico el cual se usó como referencia para poder fabricar las tejas que se estudian en esta investigación. En el manual técnico de “*un techo cubre al mundo*” de ECOSUR, considera para las tejas de 10 mm de espesor una resistencia $80 \text{ kg} = 784.532 \text{ N}$ [189]

5.7.1 Tejas de mortero de CP. Esfuerzo de flexión.

Se fabricaron tejas de mortero de CP y tejas de mortero de CP con sustituciones de 15% de CP por FCC de acuerdo con el procedimiento establecido en el apartado 4.2.8

Los resultados ponen de manifiesto un aumento del Rf conforme aumenta el tiempo de curado. Si bien en ocasiones fundamentalmente en las probetas que contienen FC las diferencias son pequeñas. Tanto para las experiencias con árido silíceo como calizo, la sustitución de estos en un 15, 25 y 100 % en volumen supone una reducción significativa de la Rf. Adicionalmente se observa Rf ligeramente superiores para las tejas fabricadas con árido silíceo, a diferencia de lo que sucede con las experiencias realizadas con las probetas prismáticas, donde las resistencias de los morteros con árido calizo eran superiores. La respuesta a este comportamiento se debe a que el árido calizo al tener diámetro medio mayor con algunas partículas con diámetro próximo a los 4 mm y las tejas tener un espesor de 10 mm, se producen discontinuidades que favorecen la formación de fisuras que afectan a la Rf. (Ver Figura 5.82)

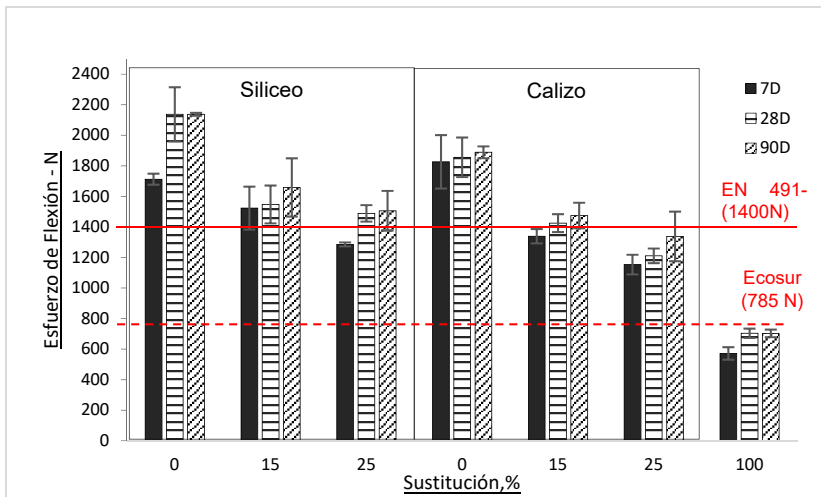


Figura 5.81 Resistencia a Flexión Transversal - Tejas - CP

Todas las tejas estudiadas, excepto las tejas con una sustitución del 25 % de árido calizo por FC y las tejas sin árido cumplirían la

norma europea que implica un esfuerzo a flexión de 1400 N. también todas las tejas excepto las tejas sin árido, cumplirían las recomendaciones de Ecosur, si bien en este caso sería por muy poco (≈ 800 N)

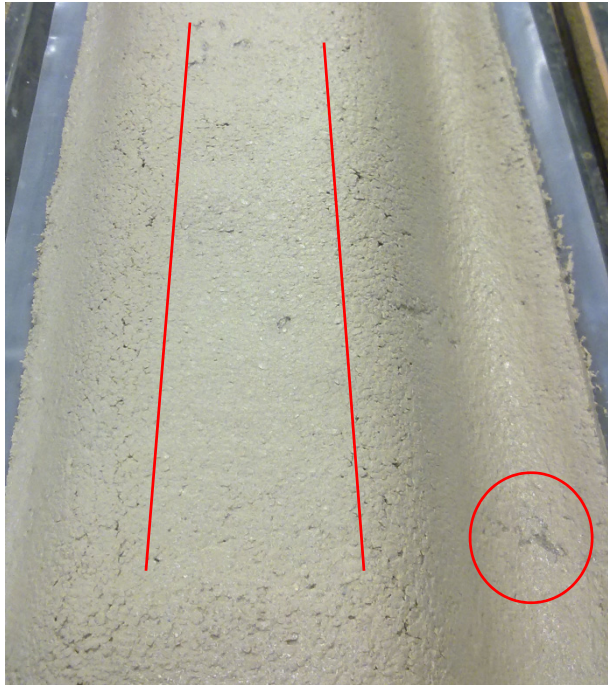


Figura 5.82 Segmento de una teja con árido calizo, las líneas rojas muestran la dirección de las grietas poco profundas

En la Figura 5.83 se representa los resultados obtenidos para las tejas similares a las anteriores, cuyos resultados se muestran en la Figura 5.81 pero con la diferencia que en este caso, en lugar de utilizar como conglomerante CP solo, se utilizó una mezcla de CP y FCC en la que se había sustituido un 15% en peso de CP por FCC. Las tendencias observadas son similares a la experiencia con solo CP (Figura 5.81) a excepción de las tejas sin árido (100 % FC), el resto cumpliría tanto la norma europea como las recomendaciones del manual técnico de Ecosur.

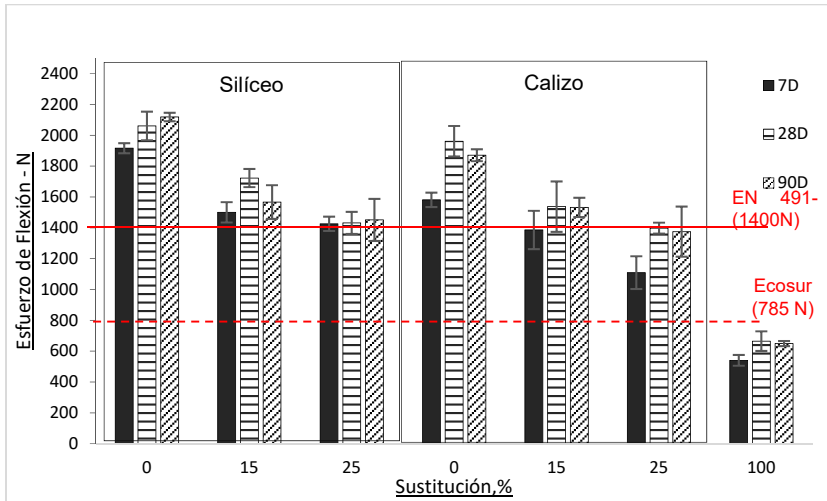


Figura 5.83 Resistencia a Flexión Transversal Tejas - CP 15% FCC

Para tratar de establecer diferencias de comportamiento entre las tejas de CP y CP 15%FCC, en la Figura 5.84 se han representado conjuntamente el esfuerzo de flexión de las tejas curadas a 28 días, que utilizan como conglomerante CP y CP 15%FCC respectivamente. Los resultados ponen de manifiesto que en general, las tejas que utilizan como conglomerante CP 15%FCC presentan una resistencia a flexión transversal superior, que sería debido a las propiedades puzolánicas del FCC. Este incremento haría que las tejas elaboradas con árido calizo y con 25% de sustitución de este por FC, cumplieren la normativa europea EN 491:2011, que para el caso de utilizar como conglomerante CP no la cumpliría. Así pues, a la vista de resultados confirmaríamos el interés de utilizar conglomerantes mixtos CP 15%FCC, que mejorarían el esfuerzo de flexión, reduciendo el coste económico y medioambiental ya que el FCC es un material residual.

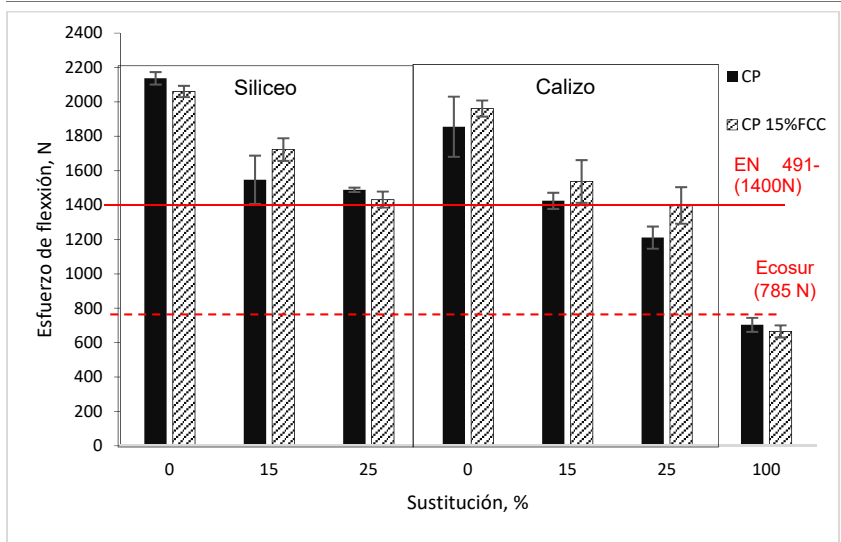


Figura 5.84 Rf tejas con CP vs CP - 15%FCC / 28D

5.7.2 Tejas de mortero de CAA con precursor de FCC. Esfuerzo de flexión.

Se fabricaron tejas de mortero de FCC activados alcalinamente de acuerdo con el procedimiento establecido en el apartado 4.2.8.1.2.

En la Figura 5.85 se representa la resistencia a flexión transversal frente al porcentaje de árido sustituido por FC. Los resultados de resistencia a la flexión transversal corresponden a sustituciones de árido por FC en un 0% (control) 15% y un 25% en volumen y usando dos tipos de áridos (silíceo y calizo) curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C a edades de 7, 28 y 90 días descritos en el apartado 4.2.9

Los resultados muestran una disminución conforme aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FC, si bien en este caso, a diferencia de los casos anteriores donde se utilizaba CP y CP 15%FCC como conglomerantes, ninguna de las tejas con FC cumpliría la norma EN 941:2011, únicamente cumplirían la norma los morteros sin FC. También como en el caso anterior

no se observarían diferencias significativas de comportamiento entre el árido silíceo y el calizo. Las recomendaciones establecidas en el documento técnico de Ecosur las cumplirían todas las tejas incluso las que no contiene árido y sólo contiene FC, que sobrepasa ligeramente los 785 N

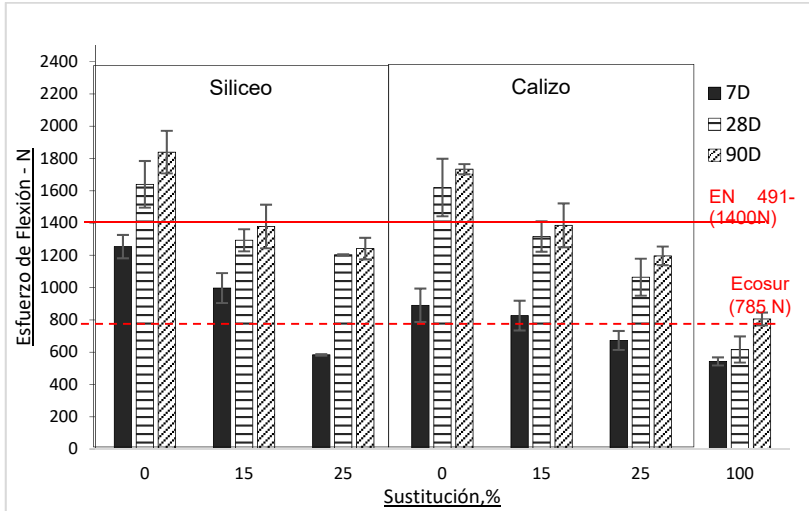


Figura 5.85 Resistencia a Flexión Transversal Tejas - FCC

5.7.3 Tejas de mortero de CAA con precursor de SC. Esfuerzo de flexión.

Se fabricaron tejas de mortero de SC activados alcalinamente de acuerdo con el procedimiento establecido en el apartado 4.2.8.1.2.

En la Figura 5.86 se representa la resistencia a flexión transversal frente al porcentaje de árido sustituido por FC. Los resultados de esfuerzo de flexión corresponden a sustituciones de árido por FC en un 0% (control) 15% y un 25% en volumen y usando dos tipos de áridos (silíceo y calizo) curados en cámara húmeda a una temperatura de 20°C a edades de 7, 28 y 90 días descritos en el apartado 4.2.9.

Los resultados muestran una tendencia similar a las experiencias anteriores en la que se utilizó como precursor FCC (Figura 5.85), si bien en este caso las tejas con árido calizo y con

sustitución del 15 % de este por FC, cumpliría la norma europea EN 491:2011, por el contrario no cumple las recomendaciones de Ecosur, para las tejas con morteros con solo FC, que si cumpliría las tejas con precursor FCC (ver Figura 5.85)

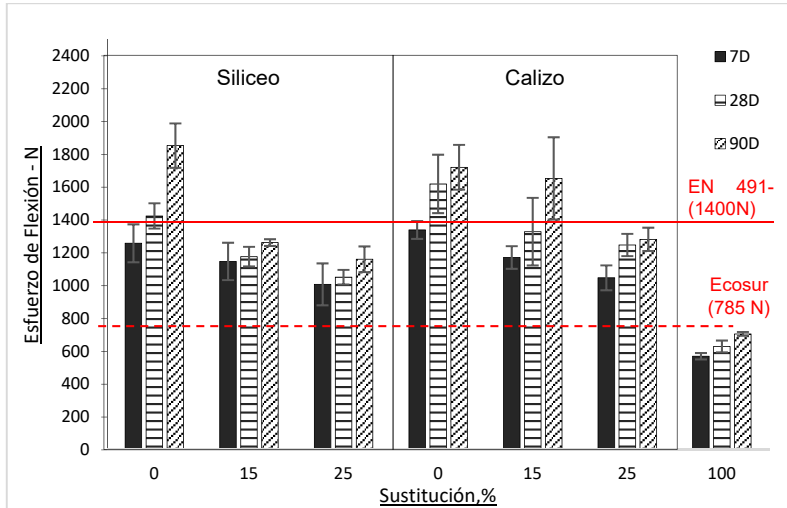


Figura 5.86 Resistencia a Flexión Transversal Tejas - SC

5.7.4 Comparación del esfuerzo de flexión de las tejas.

Observando los resultados obtenidos hasta el momento en la Figura 5.87 se representa conjuntamente las resistencias a flexión transversal de las tejas fabricadas con los 4 morteros (CP, CP-15%FCC, FCC y SC) usados en este estudio, curados en cámara húmeda a 20°C y a 90 días de edad.

Los resultados ponen de manifiesto que en general, las tejas a 90 días de edad que tienen un 15% de sustitución de árido por FC cumplirían la norma EN 491:2011, independientemente del conglomerante y tipo de árido que se usa. No sucede lo mismo para las tejas con un 25% de sustitución de árido por FC, que en este caso sólo las tejas fabricadas con CP y la teja con 25% de sustitución de árido calizo por FC y conglomerante de CP 15%FCC cumplirían dicha norma, quedando atrás las tejas con base CAA. Pero como desde el principio de esta investigación

se trabajó paralelamente en la fabricación de las tejas con el documento técnico de “*un techo cubre al mundo*” de ECOSUR, el cual considera para las tejas de 10 mm de espesor una resistencia 80 kg = 784.532 N. [190]. Desde esa perspectiva todas las tejas con árido, incluidas las tejas de morteros de activación alcalina cumplirían esta norma, que, aunque es menos exigente será de aplicación en una gran cantidad de países. Se quedan muy cerca de cumplir las exigencias de resistencia las tejas sin árido (100% FC), aunque, la que logra alcanzar esta resistencia es la teja hecha con FCC como precursor, quizá aumentando el espesor de la teja y/o con algún refuerzo más (tipo fibras de acero de los mismos NFU) talvez será posible superar el umbral requerido.

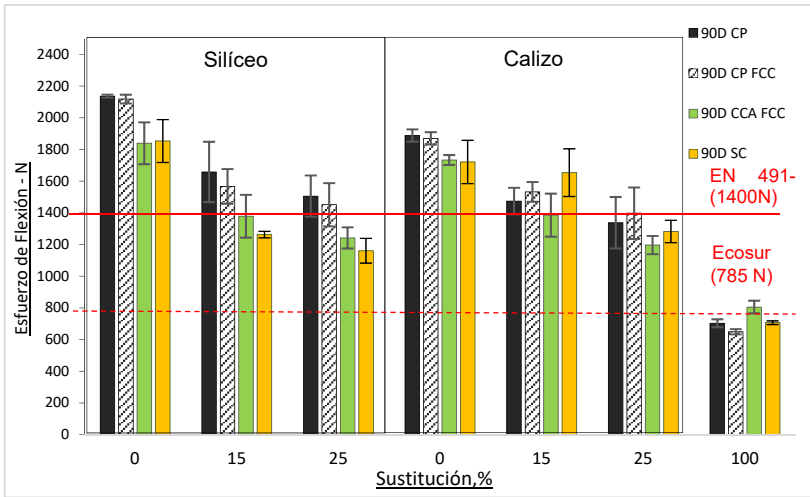


Figura 5.87 Resistencia a Flexión Transversal tejas de CP, CP-15%FCC, FCC y SC a 90 D

5.8 Tejas. Ensayo de peso y espesor.

5.8.1 Pesos

La norma EN 491:2011 en su apartado 5.5, la cual se refiere a la determinación de la masa de la teja, hace mención sobre los parámetros a considerar que son los siguientes:

La masa de cada teja redondeada a ± 25 g más cercanos.

La masa media de las tejas de las muestras redondeadas a ± 25 g.

En el documento técnico de Ecosur se consideran algunos otros parámetros, dentro de los cuales se destaca que el peso de las tejas no debe diferenciarse en más del 10% del peso esperado (el valor promedio de las tejas con espesores normales). En caso contrario, el proceso de vibrado y moldeo debe ser revisado.[189]

Establecidas las consideraciones de los documentos técnicos, se realizó el pesado de cada una de las tejas después de su proceso de curado y antes de ser ensayadas para la obtención del esfuerzo de flexión.

Tabla 5.10 Promedio de la diferencia del peso de las tejas con CP y CP 15%FCC en diferentes días de curado

	Porcentaje %	7D CP	7D CP-15%FCC	28D CP	28D CP-15%FCC	90D CP	90D CP-15%FCC
SIL	0	2,8 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	2,8 %	2,8 %
	15	2,9 %	4,3 %	2,9 %	0,0 %	2,9 %	2,9 %
	25	3,0 %	6,0 %	0,0 %	1,5 %	0,0 %	3,1 %
CAL	0	0,0 %	0,0 %	0,0 %	2,8 %	0,0 %	2,7 %
	15	0,0 %	0,0%	0,0 %	5,8 %	0,0 %	2,9 %
	25	0,0 %	0,0 %	0,0 %	3,0 %	0,0 %	0,0 %
Sin árido	100	0,0 %	0,0 %	3,9 %	0,0 %	3,9%	4,0 %

En la Tabla 5.10 se presenta el promedio de la diferencia de peso de las tejas hechas con base CP, donde se pone de manifiesto que en general ninguna de las tejas supera el 10% de diferencia establecido en el documento técnico de Ecosur.

En la Tabla 5.11 se presenta el peso de las tejas a diferentes días de edad, se pone de manifiesto que a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de árido por FC, hay una pérdida de peso, la cual también se hace notar entre el día 7 y 28 de edad, que después se estabiliza y su variación de peso es imperceptible hasta el día 90.

Tabla 5.11 Pesos de las tejas de CP y CP 15%FCC

	Porcentaje %	7D CP	7D CP-15%FCC	28D CP	28D CP-15%FCC	90D CP	90D CP-15%FCC
SIL	0	3213,33	3200,00	3180,00	3160,00	3146,67	3173,33
	15	3066,67	3080,00	3013,33	3020,00	3013,33	3013,33
	25	2966,67	2953,33	2920,00	2913,33	2900,00	2906,67
CAL	0	3240,00	3240,00	3220,00	3206,67	3220,00	3233,33
	15	3080,00	3100,00	3060,00	3053,33	3060,00	3066,67
	25	2980,00	2980,00	2960,00	2946,67	2940,00	2960,00
	100	2260,00	2260,00	2253,33	2240,00	2253,33	2246,67

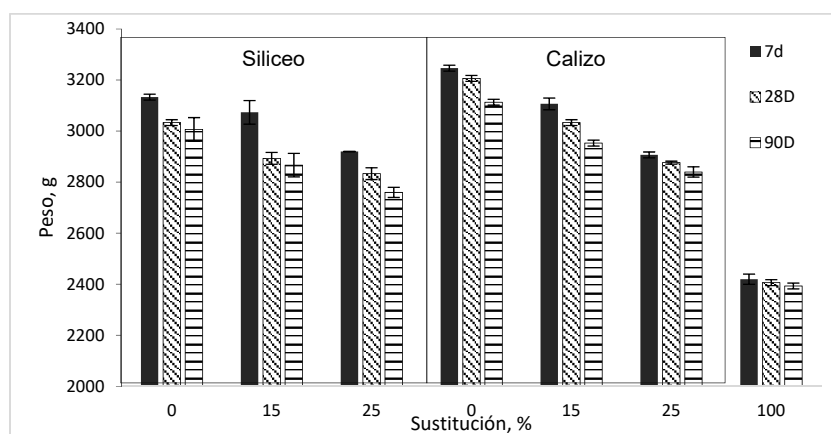


Figura 5.88 Pesos de las tejas de FCC con árido silíceo – calizo y FC

En la Figura 5.88 y Figura 5.89 se representan el peso de las tejas frente a los porcentajes de sustitución de árido por FC. Los materiales usados como precursor son FCC y SC respectivamente. Podemos observar que el comportamiento de estos morteros es muy similar a los registrados en la tabla anterior (Tabla 5.11) donde a medida que la FC se incrementa en la estructura del mortero, se reduce el peso de la teja. Así como también a medida que pasa los días de curado, se disminuye también el peso.

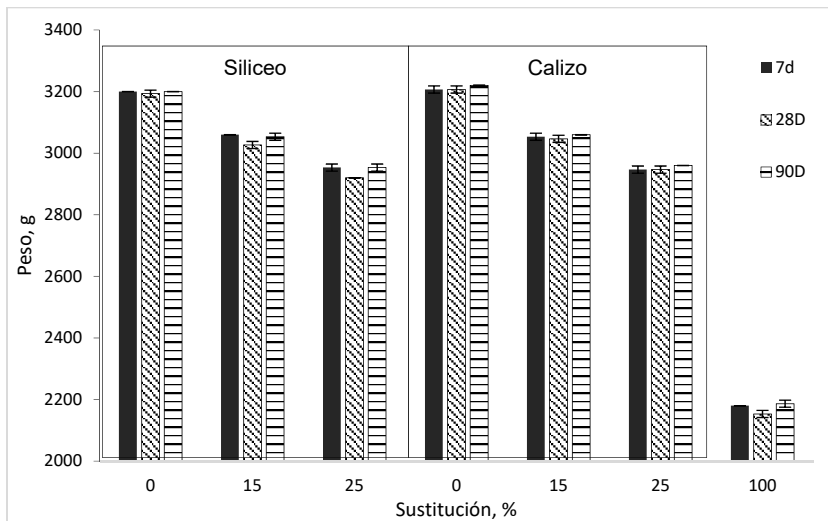


Figura 5.89 Pesos de las tejas de SC con árido silíceo – calizo y FC

Tabla 5.12 Promedio de la diferencia del peso de las tejas con FCC y SC en diferentes días de curado

	Porcentaje %	7D FCC	7D SC	28D FCC	28D SC	90D FCC	90D SC
SIL	0	2,8 %	0,0 %	2,9 %	2,8 %	3,0 %	0,0 %
	15	4,3 %	0,0 %	6,1 %	2,9 %	6,2 %	1,5 %
	25	0,0 %	3,0 %	6,3 %	0,0 %	4,8 %	3,0 %
CAL	0	2,7 %	2,8 %	2,8 %	2,8 %	2,9 %	0,0 %
	15	5,7 %	2,9 %	2,9 %	2,9 %	3,0 %	0,0 %
	25	3,1 %	3,0 %	1,5 %	3,0 %	4,7 %	0,0 %
SIN ÁRIDO	100	5,5 %	0,0 %	3,7 %	2,1 %	3,7 %	4,1 %

En la Tabla 5.12 se representa promedio de la diferencia de peso de las tejas hechas con morteros de FCC y SC respectivamente y a diferentes edades de curado, el resultado expuesto pone de manifiesto que ninguna de las tejas sobrepasa el 10% de diferencia en peso.

En la Figura 5.90 se representa los pesos de las tejas frente al porcentaje de sustitución. Aunque las relaciones de agua/conglomerante son diferentes, se alcanzan valores muy similares entre todas las tejas con árido, salvo el caso del grupo de tejas de FCC y árido silíceo, que alcanzan pesos menores con respecto al resto de tejas con el mismo árido: esta diferencia sería consecuencia de la menor densidad del árido silíceo y por la mayor relación agua/FCC. Para el caso de tejas sin árido, sobresale la teja con FCC como precursor alcanzando un +6% por encima de su equivalente de CP.

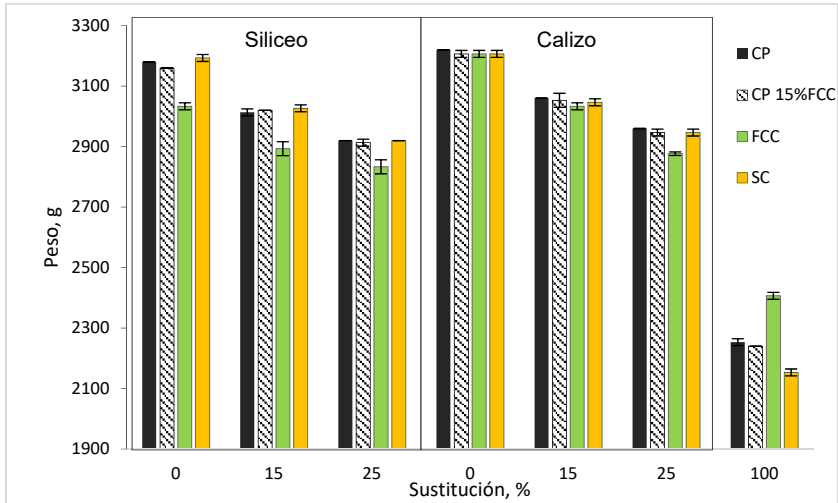


Figura 5.90 Pesos de las tejas de CP - CP15%FCC - FCC - SC a 28 días de curado

La Figura 5.91 muestra la variación del esfuerzo a flexión frente a peso, observándose una disminución de éste, conforme disminuye la masa de la teja.

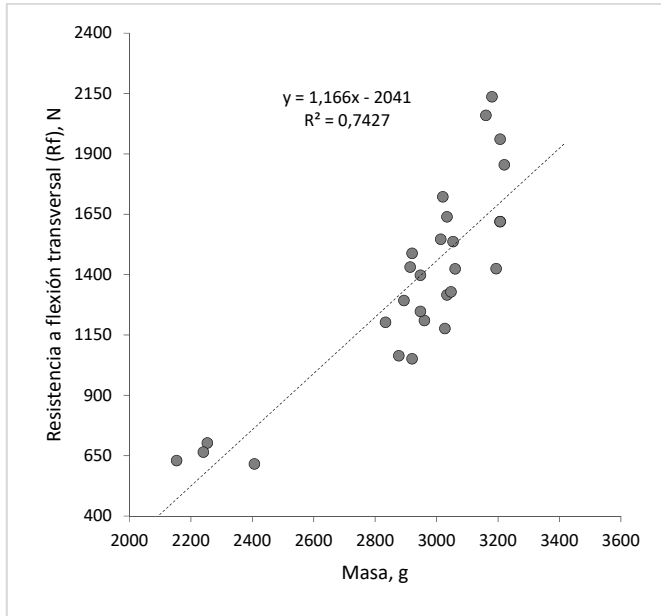


Figura 5.91 Correlación de la resistencia a flexión transversal frente a la masa de la teja

5.8.2 Espesor

Las recomendaciones de Ecosur indican que el espesor de la teja estará comprendido entre $10 \pm 0,5$ mm. Las tejas que no cumplan con los requerimientos indicados deben ser desechadas y calificadas como tejas de segunda categoría. Si el espesor presenta muchas variaciones, es conveniente examinar cómo se está haciendo la mezcla y verificar la calidad del trabajo.[189]

En la Figura 5.92 se representan los espesores medidos de las tejas curadas a 28 días de edad de los 4 grupos de morteros estudiados. Los resultados ponen de manifiesto que todas las tejas cumplen las recomendaciones descritas en el documento técnico de Ecosur.

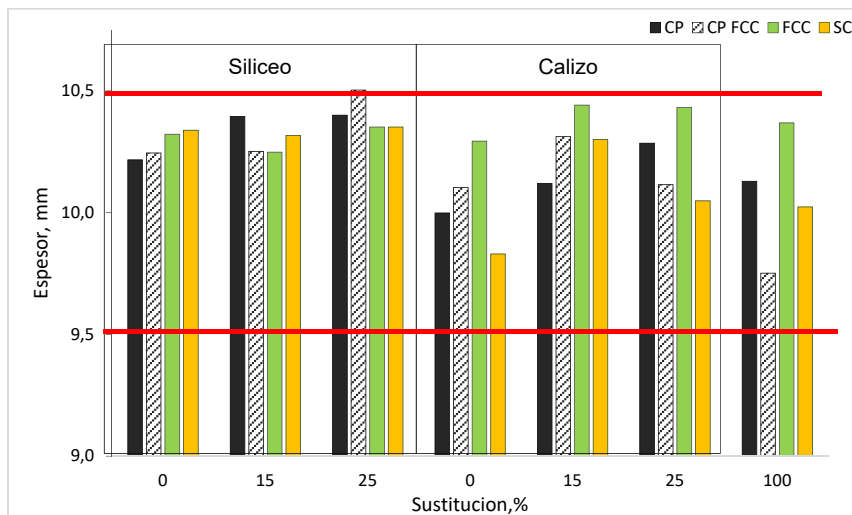


Figura 5.92 Espesor de las tejas de CP - CP15%FCC - FCC- SC a 28 días de curado

5.9 Tejas. Resistencia al impacto

De acuerdo con lo establecido en el documento técnico de Ecosur la resistencia al impacto permite evaluar la calidad del mortero utilizado, así como el proceso de fabricación de las tejas.[189]

Las recomendaciones de Ecosur nos indican que para el ensayo las tejas deben resistir al menos un impacto produciéndose una rotura frágil. Como en las experiencias realizadas en algunos casos se ha sustituido árido por FC, esto facilita un aumento de la ductilidad de la teja, que puede impedir una rotura frágil. Por ese motivo hemos considerado dos fases en el ensayo: la primera cuando aparece las primeras fisuras y la segunda cuando la teja llega a romperse, si es que esto llega a ocurrir.

En la Figura 5.93 se ve en la parte izquierda la teja rota luego del ensayo de impacto y en la parte derecha la teja con las primeras fisuras que aparecen con los primeros impactos. En la Figura

5.94 se observa parte de una teja sin árido y 100% FC donde se ve el orificio creado en la teja luego de resistir unos 150 impactos.

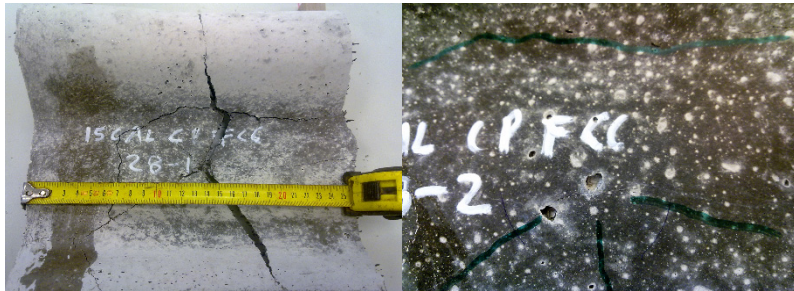


Figura 5.93 (izquierda) teja rota - (derecha) primeras fisuras en una teja con árido

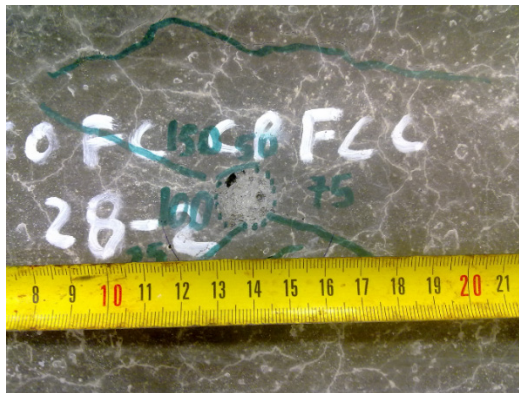


Figura 5.94 Orificio creado luego de impactos - teja con 100% FC

En la Figura 5.95 se representa el número de impactos frente al porcentaje de sustitución de árido por FC para 7, 28 y 90 días de curado. En la gráfica se han considerado dos situaciones, aparición de una primera fisura y rotura de la teja. Se observa que para los morteros con 0% de sustitución la aparición de la primera fisura y la rotura son coincidentes, ya que al no tener FC se produce una rotura frágil. Los resultados para 15 y 25 % de sustitución de árido por FC, se constata una diferencia significativa entre la aparición de la fisura y la rotura, para todos los tiempos de curado estudiados. Los resultados ponen de manifiesto un incremento del número de impactos conforme

aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FC, debido a la capacidad de absorción de energía por la fibra, en general no se observa diferencias significativas de comportamiento entre el árido silíceo y el árido calizo.

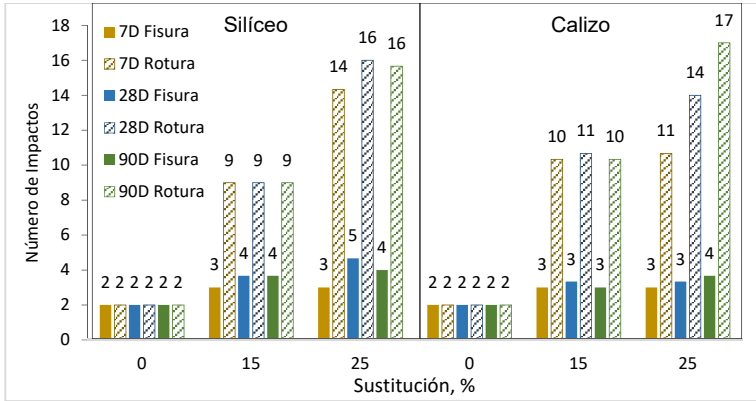


Figura 5.95 Resistencia a impacto de tejas de CP con árido

En la Figura 5.96 se representa el número de impactos para las tejas sin árido conteniendo un 100% de FC. En este caso se observa un aumento muy significativo de número de impactos tanto para la aparición de la primera fisura como para la rotura, todo eso debido a la absorción de energía por parte de la fibra que retrasa la aparición inicial de fisura y la posterior rotura

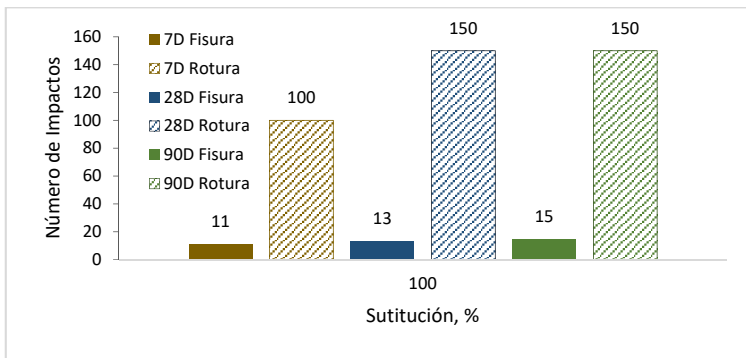


Figura 5.96 Resistencia a impacto de tejas de CP con 100% FC

En la Figura 5.97 y Figura 5.98 se representa el número de impactos frente al porcentaje de sustitución de árido en 0, 15, 25% (Figura 5.97) y sin árido - 100% FC (Figura 5.98) en este caso se sustituyó un 15% en peso del CP por FCC. Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos para las tejas hechas con morteros de CP (Figura 5.95 y Figura 5.96)

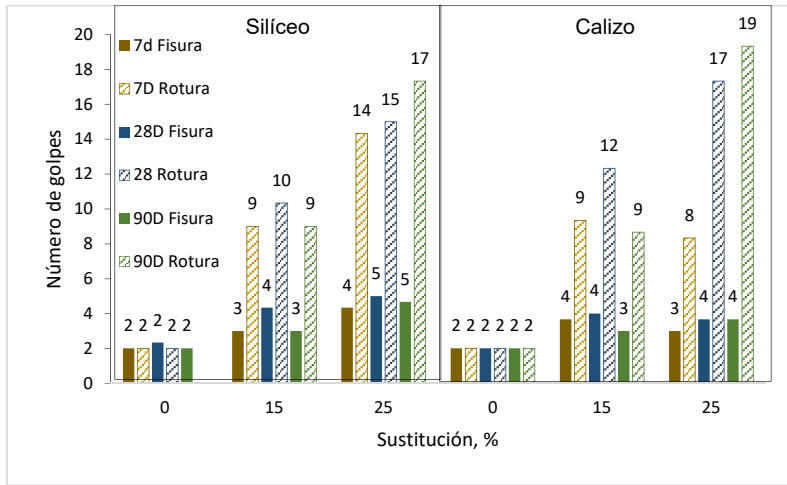


Figura 5.97 Resistencia a impacto de tejas de CP 15% FCC con árido

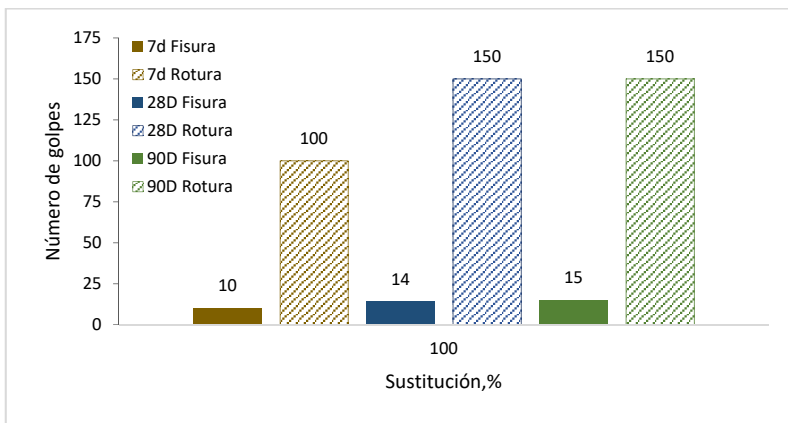


Figura 5.98 Resistencia a impacto de tejas de CP 15% FCC con 100% FC

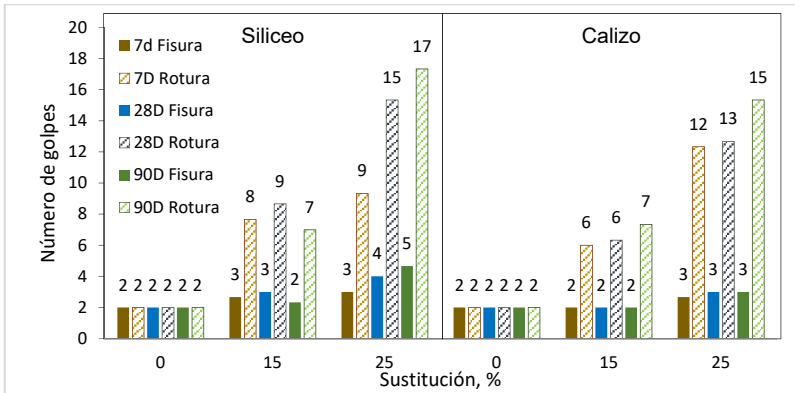


Figura 5.99 Resistencia a impacto de tejas de FCC con árido

En la Figura 5.99 se representa el número de impactos frente al porcentaje de árido sustituido por FC, se muestra los resultados de las tejas elaborados con morteros de activación alcalina usando FCC como precursor. Se constata un comportamiento similar a los conglomerantes de CP y CP 15%FCC, esto es, un aumento del número de impactos para la aparición de la primera fisura y la rotura posterior, conforme aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FC.

En la Figura 5.100 se representa el número de impactos para las tejas sin árido, conteniendo un 100 % de FC, y utilizando como conglomerante un CAA preparado con FCC como precursor, los resultados son similares a los obtenidos para CP y CP 15%FCC

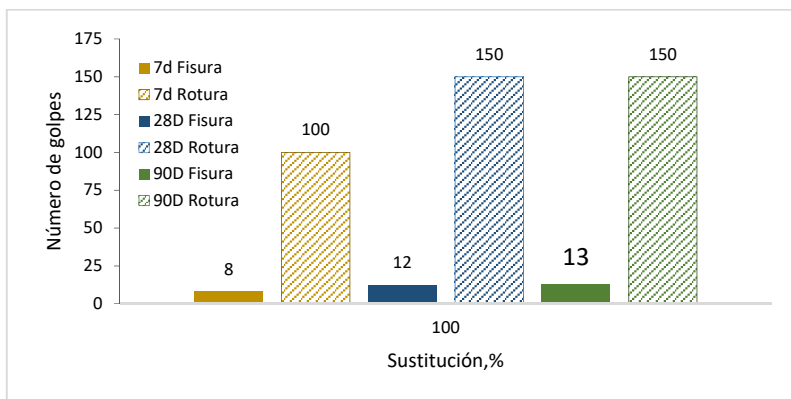


Figura 5.100 Resistencia a impacto de tejas de FCC con 100% FC

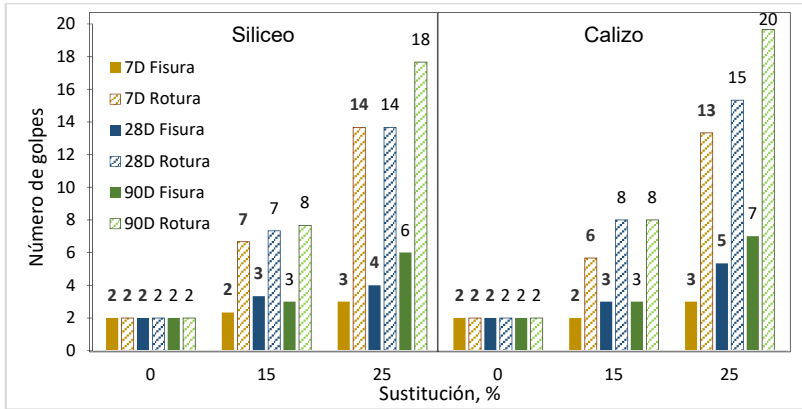


Figura 5.101 Resistencia a impacto de tejas de SC con árido

Finalmente, en la Figura 5.101 y Figura 5.102 se representa el número de impactos frente al porcentaje de árido sustituido por FC, se muestran los resultados de las tejas elaboradas con morteros de activación alcalina, usando SC como precursor. Los resultados presentados en ambas figuras siguen la misma tendencia que los estudios realizados utilizando FCC como precursor (Figura 5.99 y Figura 5.100)

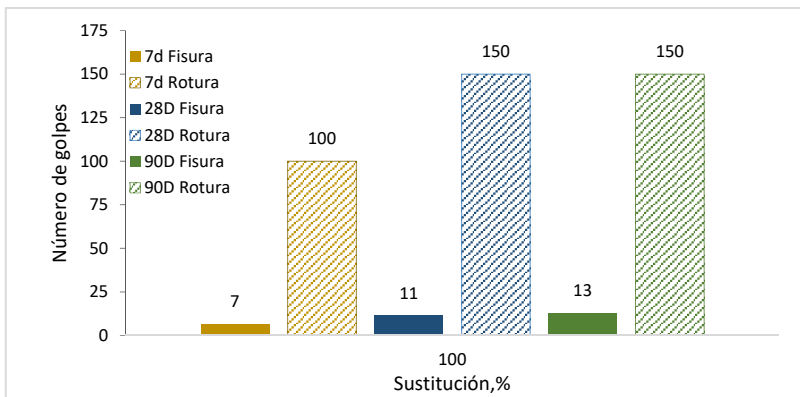


Figura 5.102 Resistencia a impacto de tejas de SC con 100% FC

Si bien hemos visto en cada una de las tejas dentro de los 4 grupos estudiados, que hay una evolución de resistencia a impacto entre el día 7 y el día 90 de curado, en la Figura 5.103 a efectos comparativos hemos seleccionado el número de impactos para que aparezca la primera fisura en tejas preparadas con los cuatro diferentes conglomerantes (CP, CP15%FCC, FCC y SC) curadas a 28 días. Los resultados ponen de manifiesto que todas las tejas ensayadas cumplen con el requisito de resistir un impacto sin producirse la rotura. En todas las matrices estudiadas se observa un aumento del número de impactos conforme aumenta el porcentaje de sustitución del árido por FC. Se aprecia una ligera diferencia entre las tejas fabricadas con árido silíceo y árido calizo, en estas últimas el número de impactos es ligeramente inferior.

Para las tejas en las que se ha sustituido parcial o totalmente el árido por FC, se observa que en general las matrices con base cemento portland tienen una resistencia a impacto ligeramente superior a las matrices geopoliméricas.

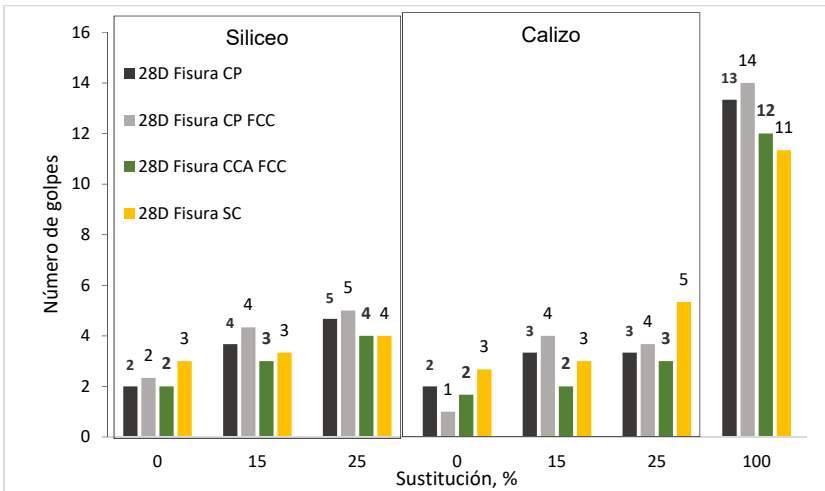


Figura 5.103 Comparativo de resistencia a impacto (aparición de la primera fisura) de tejas elaboradas con (CP - CP15%FCC - FCC - SC) a 28 días de curado.

5.10 Tejas. Ensayos de permeabilidad

En los ensayos anteriores realizados hasta el momento se logra obtener resultados numéricos y medibles, no es así el caso en los ensayos de permeabilidad, que no proporcionaron un valor numérico, sino más bien una deducción de positivo (el agua no traspasa la teja) o negativo (un número determinado de gotas que atraviesan la teja). Dicho esto, podemos concluir que todos los ensayos realizados en las tejas de los 4 grupos estudiados presentan un resultado positivo de permeabilidad.



Figura 5.104 (arriba) Tejas de FCC en ensayo de impermeabilidad dentro de la cámara húmeda. (abajo) tejas de CP y SC vistas por el lado posterior mostrando que no hay presencia alguna de humedad ni filtración de agua.

5.11 Análisis económico y medioambiental

Para poder reducir el consumo energético en los edificios hace falta trabajar con materiales que tengan baja conductividad térmica (λ). Los materiales estudiados en esta investigación pueden ayudar a disminuir el coeficiente de transmitancia térmica (U) aplicados en diversas soluciones constructivas. A continuación se muestra un ejemplo de aplicación en una cubierta inclinada convencional, Figura 5.105, con una pendiente media del 30%, compuesta de un forjado inclinado, aislamiento térmico (espesor 30 mm) y cobertura de teja.

El cálculo de la transmitancia térmica (U) de la cubierta inclinada con un mortero convencional de CP, siguiendo el procedimiento descrito en la norma EN-6946, obtiene un valor del coeficiente U de $0.67 \text{ W/m}^2\text{K}$. Teniendo en cuenta los valores de U obtenidos en la Tabla 5.13, se observan que el valor del coeficiente U de $0.58 \text{ W/m}^2\text{K}$ del mortero geopolimérico (FC 2) que utiliza FCC como precursor, es el que logra mejores resultados, poniéndose de manifiesto además que haría falta un centímetro más de aislante de poliestireno extruido, (capa C) para alcanzar el mismo coeficiente de transmitancia térmica cuando empleamos un mortero convencional de CP.

Utilización de residuos de Neumáticos Fuera de Uso en conglomerantes con base cemento portland y de activación alcalina para uso en prefabricados de bajo coste económico y medioambiental

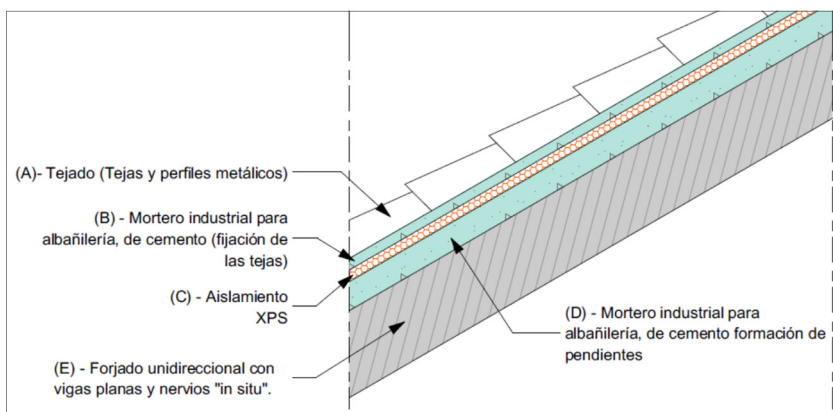


Figura 5.105 Cubierta inclinada forjado / Tablero inclinado - convencional

Tabla 5.13 Valores de Transmitancia térmica U - comparación de los 4 morteros estudiados en la investigación

Capa	Espesor (m)	Mortero de cemento convencional		Mortero de cemento		Mortero de cemento - 15%FCC		Mortero de FCC		Mortero de SC	
		λ	Rt	λ	Rt	λ	Rt	λ	Rt	λ	Rt
A	0,10	1,80	0,06	1,14	0,09	0,94	0,11	0,64	0,16	0,78	0,13
B	0,04	1,80	0,02	1,14	0,04	0,94	0,04	0,64	0,06	0,78	0,05
C	0,03	0,04	0,75	0,04	0,75	0,04	0,75	0,04	0,75	0,04	0,75
D	0,10	1,80	0,06	1,14	0,09	0,94	0,11	0,64	0,16	0,78	0,13
E	0,30	0,50	0,60	0,50	0,60	0,50	0,60	0,50	0,60	0,50	0,60
	Rt		1,48		1,56		1,61		1,73		1,66
	U		0,67		0,64		0,62		0,58		0,60
C	0,04	0,04	1,00								
	U		0,58								

Partiendo desde ésta comparación, si realizamos un análisis de costes unitarios de la misma partida de obra, usando los morteros (FC 2) y (SC 2) vemos en la Tabla 5.14 que el descompuesto usando los morteros geopoliméricos de FCC y

SC como precursores resultan con un coste menor al convencional de CP.

El análisis sólo se realiza a los materiales que forman parte de la partida de obra, no así a los costes de equipos ni mano de obra, ya que eso repercute directamente en el precio final y depende mucho de la tecnología usada en el lugar.

Tabla 5.14 Análisis de costes unitarios de los materiales usados en la partida de obra de la cubierta inclinada

Unidad	Descripción	Rendimiento	Mortero de CP convencional		Mortero FC 2 - de FCC		Mortero SC 2 - de SC	
			Precio unitario	Importe	Precio unitario	Importe	Precio unitario	Importe
Ud	Forjado unidireccional con vigas planas y nervios "in situ".	1,05	33,94	35,64	33,94	35,64	33,94	35,64
m ²	Aislante XPS	1,05	6,01	6,31	6,01	6,31	6,01	6,31
m ³	Mortero industrial para albañilería, de cemento (fijación de las tejas)	0,04	48,64	1,85	26,87	1,02	23,65	0,90
m ³	Mortero industrial para albañilería, de cemento formación de pendientes	0,11	48,64	5,50	26,87	3,04	23,65	2,67
Ud	Teja de microconcreto mixta, 43x26 cm	12,00	0,08	0,99	0,07	0,83	0,06	0,71
Ud	Teja pieza de caballete, para tejas mixtas	0,32	0,25	0,08	0,21	0,07	0,18	0,06
Ud	Teja pieza de alero	0,40	0,33	0,13	0,28	0,11	0,24	0,09
Ud	Teja pieza de remate lateral, para tejas mixtas	1,51	0,25	0,38	0,21	0,31	0,18	0,27
Ud	Teja pieza de ventilación, mixta	0,10	0,58	0,06	0,49	0,05	0,41	0,04
				50,93		47,38		46,68

Estas diferencias de precios descritas en la Tabla 5.14 vienen relacionados directamente del coste de un metro cúbico (1m³) de un mortero convencional de CP y de los morteros geopolímeros de FCC y SC, los cuales están descritos en la Tabla 5.15, donde se considera al FCC como un residuo de

coste nulo, ya que se trata de un residuo que actualmente no tiene valor comercial.

Tabla 5.15 Coste por m³ de un morteros convencional de CP, y morteros geopoliméricos (FC 2) de FCC y (SC 2) de SC

	cantidad (kg)	coste parcial (€)		cantidad (kg)	coste parcial (€)		cantidad (kg)	coste parcial (€)
CP	300	22,5	FCC	450	0	SC	450	15,75
Árido	900	26,1	Árido	0	0	Árido	0	0
Agua	120	0,04	Disolución	270	26,87	Disolución	180	7,90
FN	0	0	FN	230	0	FN	214	0
	Total	48,64		Total	26,87		Total	23,65

En la Tabla 5.16 se muestra los costes de los materiales usados en la elaboración de la disolución activadora, para los morteros geopoliméricos, los cuales repercuten directamente en el coste final del mortero.

Tabla 5.16 Coste de la disolución activadora para los morteros de FCC y SC usados como precursor – precio por m³

Material	cantidad (Tm)	Precio	coste parcial (€)
Agua	0,27	1,5	0,41
NaOH	0,08	350	26,46
CCA	0,10	0	0
		Total	26,87
Agua	0,18	1,5	0,27
Na ₂ CO ₃	0,04	200	7,63
		Total	7,90

En general los precios finales por metro cúbico (m³) de los morteros de CAA frente al mortero convencional de CP, resultan ser más económicos.

Destacar también las propiedades alcanzadas de estos nuevos materiales, que son una ventaja para su uso en diferentes tecnologías constructivas dentro de la edificación y obra civil. Cabe resaltar que el hecho de usar materiales provenientes de residuos industriales y su valorización, resalta aún más el trabajo obtenido en esta investigación, ya que, se convierte en una alternativa más para la gestión de los neumáticos fuera de uso.

Conclusiones de los ensayos en tejas

Para el análisis de resistencia a flexión transversal se tomó como referencia la normativa EN 491:2011 y las recomendaciones del documento técnico de Ecosur.

Se constata que las tejas sin FC (controles) preparadas con los cuatro conglomerantes estudiados (CP, CP 15% FCC, FCC y SC) cumplen la normativa UNE y las recomendaciones de Ecosur. También podemos afirmar que todas las tejas excepto las que no contenían árido (100% FC) cumplieron las recomendaciones de Ecosur. Sin embargo, si se observan diferencias en lo que a la normativa EN 491:2011 se refiere, entre las tejas con matriz CP y las tejas con matriz geopolimérica que contenían FC. Así por ejemplo las tejas con matriz CP (CP y CP 15%FCC) con un 15% y 25 % de sustitución de árido por FC (excepto la TC CC25 – ver código en la Tabla 4.42) cumplieron la normativa EN 491: 2011, mientras que las tejas análogas con matrices geopoliméricas no lo hicieron (excepto la TSC CC15 – ver código en la Tabla 4.50) .

Morfológica y geoméricamente las tejas fabricadas con los 4 conglomerantes (CP, CP 15%FCC, FCC y SC) guardan cierta similitud, ya que mantienen semejanza tanto en escuadría (50cm x 25 cm) como en espesor (10 mm), las diferencias ya se observan en los pesos, que va disminuyendo a medida que se sustituyen el árido por la FC y por el tipo de conglomerante.

Todas las tejas ensayadas cumplen con el requisito de resistir al menos un impacto sin producirse la rotura. En todas las matrices estudiadas se observa un aumento del número de impactos conforme aumenta el porcentaje de sustitución del árido por FC. Se aprecia una ligera diferencia entre las tejas fabricadas con árido silíceo y árido calizo, en estas últimas el número de impactos es ligeramente inferior.

Para las tejas en las que se ha sustituido parcial o totalmente el árido por FC, se observa que en general las matrices con base cemento portland tienen una resistencia a impacto ligeramente superior a las matrices geopoliméricas.

Todas las tejas estudiadas cumplieron el ensayo de permeabilidad

En general viendo los resultados de los diferentes ensayos realizados a las tejas, podemos decir que las tejas fabricadas con estos morteros que contienen FC en su estructura, pueden ser usadas como elemento de construcción en la edificación. El uso de residuos en su elaboración puede suponer un menor costo económico y medioambiental.

6) Conclusiones

- Tanto en los morteros de CP como en los morteros de activación alcalina se observa una disminución de la trabajabilidad conforme aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FN. Si bien esta disminución es más acusada para los morteros de CP.
- El tipo de árido utilizado (silíceo o calizo) tiene influencia en la trabajabilidad, así los morteros elaborados con árido calizo presentan una trabajabilidad inferior a la de los morteros con árido silíceo. Estas diferencias fueron mucho más acusadas en los morteros de CP.
- La sustitución parcial del 15% de CP por FCC supone una disminución significativa de la trabajabilidad debido a la estructura zeolítica del FCC, que facilita la absorción de agua.
- La complicada reología de los morteros de activación alcalina en los que se utilizó FCC como precursor no

permitió la medida de la trabajabilidad, este hecho fue debido a la elevada adherencia y viscosidad de la mezcla.

- La sustitución de árido por FC en morteros de CP y cemento activado alcalinamente provoca una reducción de la densidad aparente en seco y un aumento de la absorción de agua en porcentaje (Abs) a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FN. Análogamente la densidad disminuye y el porcentaje de absorción de agua aumenta cuando la relación entre conglomerante/FC disminuye.
- Los morteros fabricados con árido silíceo alcanzan valores más bajos de Dap y mayor porcentaje de absorción de agua frente a los morteros fabricados con árido calizo, esto es debido a que el árido silíceo tiene menor densidad que el árido calizo y probablemente a la poca compactación de los morteros preparados con árido silíceo.
- Exceptuando los morteros geopoliméricos que utilizan FCC como precursor, que presentan valores elevados del coeficiente de absorción (aproximadamente entre el 8% y 12%) el resto de morteros (CP, CP-FCC y SC) presentan coeficientes de absorción netamente inferiores entre 2 y 4% aproximadamente. Los elevados valores de los coeficientes de absorción de los morteros geopoliméricos que utilizan como precursor FCC, se debe probablemente a la mayor porosidad debida a su difícil compactación, así como a la mayor relación agua/precursor (0,6) empleada en su preparación.
- Se observa en las imágenes obtenidas por microscopía óptica que en todos los morteros que tienen un porcentaje de sustitución de árido por FN, se genera una red de poros muy próximo a las FN. Esto es debido a la capacidad de ocluir aire que posee la fibra durante el proceso de amasado, provocando una mala adherencia fibra-conglomerante.
- Para las 4 series de morteros trabajados, tanto con base CP (CP y CP 15%FCC) y en base CAA (FCC y SC), la

resistencia a flexotracción como a compresión se redujeron de forma considerable al sustituir árido por FN. Y de la misma forma en los morteros sin árido (100% FC) las resistencias sufrieron un detrimento a medida que la relación conglomerante/FC se reducía.

- En general la sustitución del 15% de CP por FCC en los morteros de CP optimiza sus propiedades mecánicas (flexotracción – compresión); tanto en 15 % como en 25% de sustitución de árido por FN.
- En general los resultados obtenidos para la Rc de los morteros de activación, en un 15% y 25% de sustitución de árido, alcanzan valores muy similares a sus homólogos de CP, el intervalo de resistencias a compresión del grupo de muestras estudiadas con sustitución de FN varía entre 7.91 y 34.64 MPa, lo que abre la puerta al uso de los mismos en aplicaciones estructurales. Además, mencionar que la resistencia mínima establecida para piezas de obra de fábrica es de 2.5 MPa en las de arcilla cocida y 5.0 MPa para las silicocalcáreas (EN 771-1 y EN 771-2) Esta consideración habilita a los morteros fabricados sin árido y usando CP, FCC o SC como material precursor, para la fabricación de piezas prefabricadas y piezas de obra de fábrica.
- El uso de FN en morteros con base CP o de CAA muestra un comportamiento similar en ambos casos. Se constata que, por las características físicas y químicas del caucho, tiende a repeler a la matriz y no crear una buena adherencia entre ambos, lo que repercute directamente en las resistencias mecánicas del mortero.
- Para todas las matrices estudiadas se observa una disminución de la velocidad de ultrasonido conforme aumenta el porcentaje de sustitución de árido por FC. En los morteros sin árido (100%FC) también se observó una disminución de la velocidad de ultrasonido conforme disminuye la relación conglomerante/FC.

- Se observa una disminución de la conductividad térmica conforme se incrementa el porcentaje de sustitución de árido por FC. Para morteros sin árido (100%FC) se constata una disminución de la conductividad térmica conforme disminuye la relación conglomerante/FC.
- Para el mismo porcentaje de sustitución de árido por fibra, los morteros que utilizan como conglomerante CAA presentan valores de conductividad térmica netamente inferiores a los morteros que utilizan CP.
- Los resultados de densidad aparente en seco indican de forma clara que, para valores análogos de densidad, los morteros con base CAA presentan una conductividad térmica inferior a los morteros con base CP.
- Los ensayos de termografía ponen de manifiesto que la temperatura en la cara exterior de la placa es menor a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de árido por FC.
- Las temperaturas finales obtenidas de la diferencia de temperatura (Δ °T) muestran que el árido calizo alcanza ligeramente temperaturas más bajas frente a sus homólogos de árido silíceo. Siendo los morteros sin árido (100% FC) los que alcanzan temperaturas más bajas pasado los 30 minutos de medición.
- Se constata que las tejas sin FC (controles) preparadas con los cuatro conglomerantes estudiados (CP, CP 15% FCC, FCC y SC) cumplen la normativa UNE y las recomendaciones de Ecosur. También podemos afirmar que todas las tejas excepto las que no contenían árido (100% FC) cumplieron las recomendaciones de Ecosur.
- En cuanto al cumplimiento de la normativa EN 491:2011 se refiere, en general las tejas con matriz CP con un 15% y 25 % de sustitución de árido por FC (excepto la TC CC25) cumplieron la normativa, mientras que las tejas análogas

con matriz geopoliméricas no lo hicieron (excepto la TSC CC15).

- Todas las tejas ensayadas cumplen con el requisito de resistir a un impacto sin producirse la rotura. En todas las matrices estudiadas se observa un aumento del número de impactos conforme aumenta el porcentaje de sustitución del árido por FC.
- En general, los resultados de los diferentes ensayos realizados a las tejas, muestran que las tejas fabricadas con morteros que contienen FC, podrían ser utilizadas como elemento de construcción en la edificación.

6.1 Conclusión general

Los resultados obtenidos en la presente tesis doctoral ponen de manifiesto la viabilidad en la utilización de las fibras de neumático fuera de uso, obtenidas en el proceso de recauchutado, en la preparación de morteros de CP y CAA. Estas fibras han sido utilizadas reemplazando total o parcialmente el árido de los morteros, mejorando de forma significativa propiedades como la conductividad térmica y la resistencia al impacto. Así el uso de estas fibras, supone un beneficio tanto económico como medioambiental, que tendría especiales ventajas en países en desarrollo, dónde el proceso de recauchutado de neumáticos usados, está muy extendido por el menor coste que supone frente a la adquisición de neumáticos nuevos. Así en contextos de subdesarrollo, dónde se generan grandes cantidades de fibras de neumático usado, la mayoría de ellas, en pequeños talleres, y dónde por falta de una gestión adecuada, una buena parte de ellas acaba contaminando el medio ambiente, estas fibras podrían ser utilizadas en la preparación de materiales prefabricados para uso en viviendas sociales destinadas a la población de menores recursos.

7) Líneas futuras de investigación

Una vez culminado el presente estudio sobre el uso de residuos de neumáticos fuera de uso en conglomerantes de base CP y CAA se proponen las siguientes líneas futuras de investigación:

- Estudiar el comportamiento de los morteros de CAA con FN con aditivos aireantes y/o superplastificantes y analizar y comparar la evolución sus propiedades.
- Viendo las resistencias mecánicas alcanzadas, se proponer usar cementos de menor resistencia y con mayores porcentajes de sustitución de puzolanas, ya que, para algunos elementos prefabricados se requieren menores resistencias.
- Utilización de cementos híbridos (CP-CAA) en la preparación de elementos prefabricados
- Diseñar elementos modulares mixtos de CP y CAA, donde la parte estructural sea de CP y la parte aislante sea de CAA,

esto con fines de aplicarlos a tipologías constructivas de aislamiento térmico y/o acústico.

- Utilizar más subproductos de los NFU como fibras textiles y fibras de acero en la preparación de tejas.

8) Referencias

- [1] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, “Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe. Fecha de consulta 16 de mayo 2016,” *Statewide Agricultural Land Use Baseline*, 2015. [Online]. Available: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.
- [2] Organización de las Naciones Unidas, “Proyecto de documento final de la cumbre de las Naciones Unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015. (<http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/> fecha de consulta 22 septiembre 2016).,” *Africa*, 2010. [Online]. Available: http://www2.ohchr.org/spanish/bodies/hrcouncil/docs/gaA.RES.60.1_Sp.pdf.
- [3] R. S. y M. H. M. Ali, “‘ A review on emission analysis in cement industries ’ , Renewable and Sustainable Energy Reviews.,” vol. 15, pp. 2252–2261, 2011.
- [4] W. K. Part, M. Ramli, and C. B. Cheah, “An overview on

- the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 370–395, 2015.
- [5] M. Sienkiewicz, J. Kucinska-Lipka, H. Janik, and A. Balas, “Progress in used tyres management in the European Union: A review,” *Waste Manag.*, vol. 32, no. 10, pp. 1742–1751, 2012.
- [6] Á. Uruburu, E. Ponce-Cueto, J. R. Cobo-Benita, and J. Ordieres-Meré, “The new challenges of end-of-life tyres management systems: A Spanish case study,” *Waste Manag.*, vol. 33, no. 3, pp. 679–688, 2013.
- [7] M. Sanchez and M. Guzmán, *Análisis de la eficiencia medioambiental del recauchutado de neumáticos*. ISBN: 978-84-96297-92-0. Universidad Miguel Hernández de Elche, Universida. 2012.
- [8] P. Ferrão, P. Ribeiro, and P. Silva, “A management system for end-of-life tyres: A Portuguese case study,” *Waste Manag.*, vol. 28, no. 3, pp. 604–614, 2008.
- [9] B. Milanez and T. Bührs, “Extended producer responsibility in Brazil: the case of tyre waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 6, pp. 608–615, 2009.
- [10] J. Davidovits and S. Quentin, “Geopolymers Inorganic polymeric new materials,” *J. Therm. Anal.*, vol. 37, no. 1991, pp. 1633–1656, 1991.
- [11] E. Gartner, “Industrially interesting approaches to ‘low-CO₂’ cements,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 9, pp. 1489–1498, Sep. 2004.
- [12] 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, Jan. 2014.
- [13] N. Bouzón Orgeira, “Activadores Alcalinos Alternativos a Partir De La Ceniza De Cáscara De Arroz Para La Preparación De Geopolímeros. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2015,” 2015.

- [14] S. A. D. Karaline Jones, "Beneficial Uses of Buffed Rubber as Fiber Mesh in Concrete Mixtures," vol. 1, no. 4, pp. 1–17, 2013.
- [15] J. N. Eiras, F. Segovia, M. V. Borrachero, J. Monzó, M. Bonilla, and J. Payá, "Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires," *Mater. Des.*, vol. 59, pp. 550–557, 2014.
- [16] A. A. M. Eshmaiel Ganjian, Morteza Khoramib, "Physical and mechanical properties of foamed Portland cement composite containing crumb rubber from worn tires," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 206–213, Jun. 2014.
- [17] O. Onuaguluchi and D. K. Panesar, "Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume," *J. Clean. Prod.*, vol. 82, pp. 125–131, 2014.
- [18] X. Huang, R. Ranade, W. Ni, and V. C. Li, "On the use of recycled tire rubber to develop low E-modulus ECC for durable concrete repairs," *Constr. Build. Mater.*, vol. 46, pp. 134–141, Sep. 2013.
- [19] A. R. Khaloo, M. Dehestani, and P. Rahmatabadi, "Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles.," *Waste Manag.*, vol. 28, no. 12, pp. 2472–82, Dec. 2008.
- [20] H. Ataei, "Experimental study of rubber tire aggregates effect on compressive and dynamic load-bearing properties of cylindrical concrete specimens," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 18, no. 4, pp. 665–676, 2016.
- [21] H. B. Dhonde, Y. L. Mo, T. T. C. Hsu, and J. Vogel, "Fresh and hardened properties of self-consolidating fiber-reinforced concrete," *ACI Mater. J.*, vol. 104, no. 5, pp. 491–500, 2007.
- [22] N. Ganesan, J. Bharati Raj, and A. P. Shashikala, "Flexural fatigue behavior of self compacting rubberized concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 7–14, 2013.

- [23] J. Xue and M. Shinozuka, "Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability," *Constr. Build. Mater.*, vol. 42, no. 2013, pp. 196–204, 2013.
- [24] T. Gupta, S. Chaudhary, and R. K. Sharma, "Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 562–574, 2014.
- [25] R. Siddique and T. R. Naik, "Properties of concrete containing scrap-tire rubber--an overview.," *Waste Manag.*, vol. 24, no. 6, pp. 563–9, Jan. 2004.
- [26] M. M. R. Taha, M. Asce, and M. A. A. El-wahab, "Mechanical , Fracture , and Microstructural Investigations," vol. 20, no. 10, pp. 640–649, 2009.
- [27] S. Herrero, P. Mayor, and F. Hernández-Olivares, "Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars," *Mater. Des.*, vol. 47, pp. 633–642, 2013.
- [28] N. Flores Medina, D. Flores-Medina, and F. Hernández-Olivares, "Influence of fibers partially coated with rubber from tire recycling as aggregate on the acoustical properties of rubberized concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 129, pp. 25–36, 2016.
- [29] Ministerio de Medio Ambiente., "Estrategia Española de Desarrollo Sostenible," 2007.
- [30] B. I. D. D. BID, "Situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe," pp. 1–3, 2015.
- [31] OPS, "Informe de la evaluación regional en América Latina y El Caribe," p. 17, 2005.
- [32] SIGNUS, "Plan empresarial de prevención de Neumáticos Fuera de Uso 2010 - 2013 (extracto)," 2013.
- [33] SIGNUS, "Estudio teórico-práctico de los distintos materiales procedentes del NFU para su incorporación como componente o aditivo .," 2011.

- [34] ETRMA, "European tyre & rubber industry ETRA <http://www.etrma.org/library-2/public-consultations> Fecha de consulta: 16 de mayo 2017," 2016.
- [35] ETRMA, "ETRMA 2010 - 2014 - 2015 ELT Management Figures. <http://www.etrma.org/library-2/publications-reports> Fecha de consulta 01 junio 2017," 2015.
- [36] B. O. del Estado, "España. Resolución de 8 de octubre de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 5 de octubre de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso.," 260, pp. 39547–39555, 2001.
- [37] D. O. de la U. Europea, "Directiva 2006/12/CE, de 12 de abril de 2006, relativa a los residuos," 2006.
- [38] SIGNUS, "SIGNUS - Memoria 2011," 2011.
- [39] SIGNUS, "NFU- especificaciones de los materiales " 28 de mayo 2013." 2013.
- [40] E. Español, "imagen del incendio en Seseña. http://www.elespanol.com/espana/20160513/124487568_0_124517548_9.html fecha de consulta 01 de junio 2017." p. 1, 2017.
- [41] 3 de Enero de 2006 Boletín Oficial del Estado, "España. Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso," 2006.
- [42] D. O. de la U. Europea, "Unión Europea. Directiva 2000/53/CE de 18 de septiembre de 2000 relativa a los vehículos al final de su vida útil.," 2000.
- [43] núm. 25 Boletín Oficial del Estado, 29 de enero de 2002, "España. Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero," 2002.
- [44] núm. L. Diario Oficial de la Unión Europea, 16 de julio del 1999, "Unión Europea. Directiva 1999/31/CE de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos.," 1999.
- [45] num. 96 Boletín Oficial del Estado, 22 de Abril de 1998,

- “España. Ley 10/1998, de 21 de Abril, de Residuos,” 1998.
- [46] Diario Oficial de la Unión Europea, “Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008 , sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.,” 2008.
- [47] E. L. P. Gira and E. L. P. De, “Cuadernos del Observatorio de Medio Ambiente - En pocas palabras- Neumáticos fuera de uso.,” pp. 1–76, 2006.
- [48] D. E. M. Ambiente, “Plan Nacional Integrado de Residuos , 2008-2015 Informe de Sostenibilidad Ambiental (ISA).” 2015.
- [49] E. Serrano, L. García, and M. Fraile, *Valorización Material Y Energética De Neumáticos Fuera De Uso* ISBN: 978-84-611-8343-2. CEIM Dirección General de Universidades e Investigación. 2007.
- [50] J. N. Eiras, “Diseño de mezclas cementantes con residuos de neumáticos para la obtención de materiales ligeros y aislantes. Tesis de Máster, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.”
- [51] Canalmotor7.blogspot.com.es, “<http://canalmotor7.blogspot.com.es/2013/06/dispositivos-de-seguridad-del-vehiculo.html> fecha de consulta 14 de mayo 2016,” 2013. .
- [52] SIGNUS, “<http://www.signus.es/es/cadena-de-valor/reciclaje-y-valorizacion-material/info/aplicaciones-de-los-neumaticos-reciclados>,” 2016. .
- [53] P.- Art, “http://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-424546116-ojotas-de-caucho-artesantias-exclusivos_JM. Consulta realizada el 01 de junio del 2017.” .
- [54] Z. Z. Kang and B. J. Zhang, “Scrap Tires Recycling in Landscape Engineering,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 374–377, pp. 1571–1575, 2011.
- [55] N. J. Kruis, “Analysis of the Performance of Earthship Housing,” *Energy*, vol. Es2007-360, pp. 1–10, 2007.

- [56] M. Freney, V. Soebarto, and T. Williamson, "Earthship monitoring and thermal simulation," *Archit. Sci. Rev.*, vol. 56, no. 3, pp. 208–219, 2012.
- [57] M. Reynolds, *EarthShip-VOL2*. ISBN: 0-9626767-1-3, Hemisferio. 2011.
- [58] M. Reynolds, *EarthShip-VOL1*. ISBN: 0-9626767-0-5. 1990.
- [59] M. Reynolds, *EarthShip-VOL3* ISBN:0-9626767-2-1, Solar surv. 1993.
- [60] P. Groth, "Fibre reinforced concrete : fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders," *Struct. Eng. Luleå Tek. Univ.*, vol. 2, pp. 154–172, 2000.
- [61] BÉTON, "Histoire du béton - Encyclopédie Universalis . Disponible:
<http://www.universalis.fr/encyclopedie/beton/1-histoire-du-beton/>," p. 1.
- [62] ICTSD, "Asbestos crean controversia en reunión de la Convención de Róterdam. Disponible:
<http://ictsd.org/i/news/puentesquincenal/10159/>," 2013. [Online]. Available:
<http://ictsd.org/i/news/puentesquincenal/10159/>.
- [63] Y. Wang and V. C. L. H. C. Wu, "Concrete reinforcement with recycled fibers," *Mater. Civ. Eng.*, vol. 12, pp. 314–319, 2000.
- [64] S. Bentur, Arnon; Mindess, "Fibre Reinforced Cementitious Composites," *Mod. Concr. Technol. Ser.*, pp. 1–625, 2007.
- [65] M. M. Al-Tayeb, B. H. Abu Bakar, H. Ismail, and H. M. Akil, "Effect of partial replacement of sand by recycled fine crumb rubber on the performance of hybrid rubberized-normal concrete under impact load: Experiment and simulation," *J. Clean. Prod.*, vol. 59, no. 2013, pp. 284–289, 2013.
- [66] B. Huang, G. Li, S. Pang, and J. Eggers, "Investigation into

- Waste Tire Rubber-Filled Concrete,” no. June, pp. 187–194, 2004.
- [67] O. By, Z. K. Khatib, and F. M. Bayomy, “Rubberized portland cement concrete by,” no. August, pp. 206–213, 1999.
- [68] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, and T. Özturan, “Properties of rubberized concretes containing silica fume,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 12, pp. 2309–2317, Dec. 2004.
- [69] S. Sgobba, G. Carlo Marano, M. Borsa, and M. Molfetta, “Use of Rubber Particles from Recycle Tires as Concrete Aggregate for Engineering Applications,” *Second Int. Conf. Sustain. Constr. Mater.*, vol. 3, pp. 1–11, 2010.
- [70] F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, and S. Jalali, “Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, no. 2012, pp. 714–724, 2012.
- [71] J. P. J. Eiras, F. Segovia, M. Bonilla, M^a Victoria Borrachero, José Monzó, “Conglomerados ligeros de cemento portland con residuos de neumático fuera de uso,” pp. 1–9, 2010.
- [72] B. Huang, X. Shu, and J. Cao, “A two-staged surface treatment to improve properties of rubber modified cement composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 270–274, Mar. 2013.
- [73] İ. B. Topçu and A. Demir, “Durability of Rubberized Mortar and Concrete,” no. February, pp. 173–178, 2007.
- [74] O. Youssf, M. a. ElGawady, J. E. Mills, and X. Ma, “An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, pp. 522–532, Feb. 2014.
- [75] I. B. Topçu, “The properties of rubberized concretes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 304–310, 1995.
- [76] A. Of, T. H. E. Brittleness, and O. F. R. Concretes, “Osmangazi University, Civil Eng. Dept., Eskisehir, Türkiye

- (Communicated by F.W. Lecher) (Received January 25, 1996; in final form December 3, 1996),” vol. 27, no. 2, pp. 177–183, 1997.
- [77] N. I. Fattuhi and L. a. Clark, “Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 10, no. 4, pp. 229–236, Jun. 1996.
- [78] P. Sukontasukkul and C. Chaikaew, “Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 7, pp. 450–457, Sep. 2006.
- [79] N. Segre and I. Joekes, “Use of tire rubber particles as addition to cement paste,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 9, pp. 1421–1425, Sep. 2000.
- [80] E. Ozbay, M. Lachemi, and U. K. Sevim, “Compressive strength, abrasion resistance and energy absorption capacity of rubberized concretes with and without slag,” *Mater. Struct.*, vol. 44, no. 7, pp. 1297–1307, 2011.
- [81] C. Naito, J. States, C. Jackson, and B. Bewick, “Crumb Rubber Concrete Performance under Near Field Blast and Ballistic Demands,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 9, pp. 1–10, Oct. 2013.
- [82] C. Wang, Y. Zhang, and A. Ma, “Investigation into the Fatigue Damage Process of Rubberized Concrete and Plain Concrete by AE Analysis,” no. July, pp. 953–960, 2011.
- [83] M. K. Batayneh, I. Marie, and I. Asi, “Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries,” *Waste Manag.*, vol. 28, no. 11, pp. 2171–2176, Nov. 2008.
- [84] A. O. Atahan and A. Ö. Yücel, “Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 617–622, Nov. 2012.
- [85] M. C. Bignozzi and F. Sandrolini, “Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 4, pp. 735–739, Apr. 2006.
- [86] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, G. Khoshnaw, and S. İpek,

- “Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 63, pp. 206–213, 2014.
- [87] J. B. Suh, D. Ph, and S. G. Kelly, “Stress Response of a Rubber Block under Vertical Loading,” pp. 770–783, 2012.
- [88] X. Huang, R. Ranade, W. Ni, and V. C. Li, “On the use of recycled tire rubber to develop low E-modulus ECC for durable concrete repairs,” *Constr. Build. Mater.*, pp. 1–32, 2013.
- [89] F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, and S. Jalali, “Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, no. 2012, pp. 714–724, 2012.
- [90] C. Naito, J. States, C. Jackson, and B. Bewick, “Crumb Rubber Concrete Performance under Near Field Blast and Ballistic Demands,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 9, pp. 1–10, 2014.
- [91] A. B. Senouci and M. ASCE, “Rubber-tire particles as concrete aggregate. mineral,” *Mater. Civ. Eng.*, vol. 5, pp. 478–496, 1994.
- [92] I. S. M. Valdor, “Caracterización de neumáticos fuera de uso troceados para su reciclado en obra civil,” 2009.
- [93] Z. K. Khatib and F. M. Bayomy, “Rubberized Portland cement concrete,” vol. 11, no. August, pp. 206–213, 1999.
- [94] F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, and S. Jalali, “Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 714–724, May 2012.
- [95] F. C. F. Raghavan D., Huynh H., “Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber filled cementitious composite,” *J. Mater. Sci.*, vol. 33, no. 1745–1752, 1998.
- [96] A. P. M. T. J. L. Akasaki, A. C. Marques, M. L. Marques,

- “Mortar added by tyre rubber residues: Characterisation in fresh and hardened state.,” *Univ. Estadual Paul.*, vol. 1, pp. 1–5, 2004.
- [97] 2007 Turatsinze A, Bonnet S., Granju J.L., “Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based mortars: Improvement of in cracking shrinkage resistance.,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, pp. 176–181, 2007.
- [98] N. Oikonomou and S. Mavridou, “Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 6, pp. 403–407, 2009.
- [99] J. J. (eds. . Limbachiya, M.C. & Roberts, “Sustainable waste management and recycling: used/ post-consumer tyres: proceedings of the international conference organised by the Concrete and Masonry Research Group and held at Kingston University. London,” *Concr. Mason. Res. Gr. held Kingst. Univ. London*, pp. 148–173, 2004.
- [100] G. Patrik, “Fibre reinforced concrete. Tesis doctoral - Lulea University of technology,” 2000.
- [101] X. Shu and B. Huang, “Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 217–224, 2013.
- [102] A. B. By Nell N . Eldin , Member , ASCE Senouci and A. Member, “Rubber - Tire Particles as concrete aggregate,” vol. 5, no. 4, pp. 478–496, 1994.
- [103] S. Rostami, H., Zandi, I., “Recycling of Waste Tire in Concrete. Concrete 2000 International Conference on Concrete Technology , Dundee, Scotland, p. 391-399. 1993.”
- [104] C. Albano, N. Camacho, J. Reyes, J. L. Feliu, and M. Hernández, “Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing,” *Compos. Struct.*, vol. 71, no. 3–4, pp. 439–446, 2005.
- [105] G. Li, M. A. Stubblefield, G. Garrick, J. Eggers, C. Abadie,

- and B. Huang, "Development of waste tire modified concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 12, pp. 2283–2289, 2004.
- [106] A. Benazzouk, K. Mezreb, G. Doyen, A. Goullieux, and M. Quéneudec, "Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 7, pp. 711–720, 2003.
- [107] A. Benazzouk, O. Douzane, T. Langlet, K. Mezreb, J. M. Roucoult, and M. Quéneudec, "Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 10, pp. 732–740, 2007.
- [108] P. Sukontasukkul, "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 1084–1092, 2009.
- [109] D. R. K. Paine K.A., Moroney R.C., "Application of granulated rubber to improve thermal efficiency of concrete," *Sustain. waste Manag. Recycl. used/ post-consumer tyres Proc. Int. Conf. organised by Concr. Mason. Res. Gr. held Kingst. London. 14-15 Sept. 2004. Univ. M.C. Robert.*
- [110] Q. M. Laidoudi B., Marmoret L., "Reuse of rubber waste in cementitious composites Hygrothermal behaviour.," *Sustain. waste Manag. Recycl. used/ post-consumer tyres Proc. Int. Conf. organised by Concr. Mason. Res. Gr. held Kingst. London.*, vol. 2, pp. 62–66, 2004.
- [111] a. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, and M. Quéneudec, "Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 4, pp. 573–579, 2008.
- [112] W. Wongkeo, P. Thongsanitgarn, K. Pimraksa, and A. Chaipanich, "Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials," *Mater. Des.*, vol. 35, pp. 434–439, 2012.

- [113] M. Y. J. Liu, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, and K. H. Mo, "Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete," *Energy Build.*, vol. 72, pp. 238–245, 2014.
- [114] A. Edinçliler, G. Baykal, and A. Saygili, "Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 6, pp. 1073–1080, 2010.
- [115] X. Huang, R. Ranade, Q. Zhang, W. Ni, and V. C. Li, "Mechanical and thermal properties of green lightweight engineered cementitious composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 954–960, 2013.
- [116] M. R. Hall, K. B. Najim, and C. J. Hopfe, "Transient thermal behaviour of crumb rubber-modified concrete and implications for thermal response and energy efficiency in buildings," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 33–34, pp. 77–85, 2012.
- [117] a. M. Papadopoulos, "State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments," *Energy Build.*, vol. 37, no. 1, pp. 77–86, 2005.
- [118] B. Yesilata, Y. Isiker, and P. Turgut, "Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1878–1882, 2009.
- [119] B. J. Lee and S. Pessiki, "Thermal performance evaluation of precast concrete three-wythe sandwich wall panels," *Energy Build.*, vol. 38, no. 8, pp. 1006–1014, 2006.
- [120] Ficem, "Informe estadístico FICEM 2013," 2013.
- [121] K.-H. Yang, Y.-B. Jung, M.-S. Cho, and S.-H. Tae, "Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 103, pp. 774–783, 2015.
- [122] CEPCO. Confederación Española de Asociaciones de Fabricantes de Productos de Construcción, "Informe coyuntura CEPCO. Enero 2014', España," 2015.

- [123] C. a. Hendriks, E. Worrell, and D. De Jager, "Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry," *Energy Agency (IEA)*, pp. 1–11, 2002.
- [124] J. Deja, A. Uliasz-Bochenczyk, and E. Mokrzycki, "CO2 emissions from Polish cement industry," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 4, no. 4, pp. 583–588, Jul. 2010.
- [125] A. Hasanbeigi, C. Menke, and L. Price, "The CO2 abatement cost curve for the Thailand cement industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 15, pp. 1509–1518, 2010.
- [126] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, and A. Jullien, "Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation," *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. 5, pp. 478–485, Mar. 2010.
- [127] H. H. y B. E. V. Hoenig, "'Carbon Capture Technology - Options and Potentials for the Cement Industry' Portland Cement Association, Tech.Rep. TR 044/2007," 2007.
- [128] J. Deja, A. Uliasz-Bochenczyk, and E. Mokrzycki, "CO2 emissions from Polish cement industry," *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 4, no. 4, pp. 583–588, 2010.
- [129] E. Mokrzycki y A. Uliasz Bochenczyk, "Alternative fuels for the cement industry," *Appl. Energy*, vol. 74, n, pp. 95–100, 2003.
- [130] Laurent Barcelo, John Kline, Gunther Walenta, and Ellis Gartner, "Cement and carbon emissions," *Mater. Struct.*, vol. 47, pp. 1055–1065, 2014.
- [131] A. Bosoaga, O. Masek, and J. E. Oakey, "CO2 Capture Technologies for Cement Industry," *Energy Procedia*, vol. 1, no. 1, pp. 133–140, 2009.
- [132] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, and E. M. Gartner, "Sustainable development and climate change initiatives," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 115–127, 2008.
- [133] L. K. Turner and F. G. Collins, "Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: A comparison between geopolymers

- and OPC cement concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 43, pp. 125–130, 2013.
- [134] S. Ioannou, L. Reig, K. Paine, and K. Quillin, "Properties of a ternary calcium sulfoaluminate-calcium sulfate-fly ash cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 56, pp. 75–83, 2014.
- [135] S. Ioannou, K. Paine, L. Reig, and K. Quillin, "Performance characteristics of concrete based on a ternary calcium sulfoaluminate–anhydrite–fly ash cement," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 55, pp. 196–204, Jan. 2015.
- [136] A. Guerrero, S. Goñi, I. Campillo, and A. Moragues, "Belite cement clinker from coal fly ash of high Ca content. Optimization of synthesis parameters," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 38, no. 11, pp. 3209–3213, 2004.
- [137] A. Guerrero, S. Goni, A. Moragues, and J. S. Dolado, "Microstructure and Mechanical Performance of Belite Cements from High Calcium Coal Fly Ash," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 88, no. 7, pp. 1845–1853, 2005.
- [138] S. Goñi, A. Guerrero, and M. P. Lorenzo, "Cementos Belíticos: Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis de Rayos X," *Cem. y Hormigón*, vol. 917, pp. 4–15, 2008.
- [139] M. A. A. Abd Elaty and M. F. Ghazy, "Performance of Portland cement mixes containing silica fume and mixed with lime-water," *HBRC J.*, vol. 10, no. 3, pp. 247–257, Dec. 2014.
- [140] M. Radlinski and J. Olek, "Investigation into the synergistic effects in ternary cementitious systems containing portland cement, fly ash and silica fume," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 4, pp. 451–459, Apr. 2012.
- [141] B. W. Langan, K. Weng, and M. A. Ward, "Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 7, pp. 1045–1051, Jul. 2002.
- [142] A. Schöler, B. Lothenbach, F. Winnefeld, and M. Zajac, "Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and

- limestone powder,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 55, pp. 374–382, Jan. 2015.
- [143] K. Celik, C. Meral, A. Petek Gursel, P. K. Mehta, A. Horvath, and P. J. M. Monteiro, “Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 56, pp. 59–72, Feb. 2015.
- [144] A. M. Rashad, “Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 340–357, Dec. 2014.
- [145] J. Payá, J. Monzó, M. V. Borrachero, E. Peris-Mora, and L. M. Ordóñez, “Studies on crystalline rice husk ashes and the activation of their pozzolanic properties,” *Wascon, Leeds (United Kingdom)*, 2000.
- [146] L. M. Ordóñez, “Tesis: Reutilización de la ceniza de cáscara de arroz como material de construcción: valorización y optimización de sus propiedades puzolánicas,” 2007.
- [147] G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, L. M. Tavares, and E. M. R. Fairbairn, “Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 5, pp. 410–418, May 2008.
- [148] M. Frías, E. Villar, and H. Savastano, “Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 4, pp. 490–496, Apr. 2011.
- [149] R. Méndez, J. Tábora, M. V. Borrachero, J. Payá, and J. Monzó, “Optimización de mezclas cal-puzolana destinadas a la construcción de materiales prefabricados no convencionales.” III Simposio Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción, Nov-2010.
- [150] M. Frías, H. Savastano, E. Villar, M. I. Sánchez de Rojas,

- and S. Santos, "Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 9, pp. 1019–1023, Oct. 2012.
- [151] E. Zornoza, P. Garcés, J. Payá, and M. A. Climent, "Improvement of the chloride ingress resistance of OPC mortars by using spent cracking catalyst," *Cem. Concr. Res.*, vol. 39, no. 2, pp. 126–139, Feb. 2009.
- [152] R. Siddique and J. Klaus, "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review," *Appl. Clay Sci.*, vol. 43, no. 3–4, pp. 392–400, Mar. 2009.
- [153] F. Baeza, J. Payá, O. Galao, J. M. Saval, and P. Garcés, "Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 645–653, 2014.
- [154] D. Khale and R. Chaudhary, "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 3, pp. 729–746, Jan. 2007.
- [155] A. A. and E. Najafi Kani, "Construction wastes as raw materials for geopolymers binders," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 154–160, 2009.
- [156] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, and J. S. J. van Deventer, "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 269, no. 1–3, pp. 47–58, Nov. 2005.
- [157] S. A. Bernal, "Effect of the activator dose on the compressive strength and accelerated carbonation resistance of alkali silicate-activated slag/metakaolin blended materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 217–226, 2015.
- [158] J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, *Libro: Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial*

Applications. 2009.

- [159] A. Palomo, P. Krivenko, I. Garcia-Lodeiro, E. Kavalerova, O. Maltseva, and A. Fernández-Jiménez, "A review on alkaline activation: new analytical perspectives," *Mater. Construcción*, vol. 64, no. 315, pp. 1–13, 2014.
- [160] John L. Provis and Jannie S. J. van Deventer, *Libro: Alkali activated materials: State of the Art Report, RILEM TC 224-AAM*. Springer, 2014.
- [161] D. M. Roy, "Alkali-activated cements Opportunities and challenges," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 2, pp. 249–254, Feb. 1999.
- [162] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, and S. Jalali, "Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 7, pp. 1315–1322, Jul. 2008.
- [163] V. N. Castaldelli *et al.*, "Use of slag/sugar cane bagasse ash (SCBA) blends in the production of alkali-activated materials," *Materials (Basel)*, vol. 6, pp. 3108–3127, 2013.
- [164] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, Aug. 1999.
- [165] M. M. Tashima, "Tesis doctoral: Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del Silicoaluminato Cálcico Vítreo (VCAS)," 2012.
- [166] H. Xu and J. S. J. Van Deventer, "The geopolymerisation of alumino-silicate minerals," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 59, no. 3, pp. 247–266, Jun. 2000.
- [167] J. Davidovits, "Geopolymers - Inorganic polymeric new materials," *J. Therm. Anal.*, vol. 37, no. 8, pp. 1633–1656, 1991.
- [168] J. Davidovits, "Geopolymer Cement, a review," *Geopolymer Inst. Libr.*, no. 0, pp. 1–11, 2013.
- [169] 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, Jul. 2011.
- [170] S. Bernal, R. De Gutierrez, S. Delvasto, and E. Rodriguez, "Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 208–214, Feb. 2010.
- [171] J. L. Vilaplana, F. J. Baeza, O. Galao, E. G. Alcocel, E. Zornoza, and P. Garcs, "Mechanical properties of alkali activated blast furnace slag pastes reinforced with carbon fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 116, pp. 63–71, 2016.
- [172] J. Il Choi, B. Y. Lee, R. Ranade, V. C. Li, and Y. Lee, "Ultra-high-ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced alkali-activated slag-based composite," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 70, pp. 153–158, 2016.
- [173] S. J. Choi, J. Il Choi, J. K. Song, and B. Y. Lee, "Rheological and mechanical properties of fiber-reinforced alkali-activated composite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 112–118, 2015.
- [174] Y. Lee, J. Il Choi, and H. K. Kim, "Effects of a defoamer on the compressive strength and tensile behavior of alkali-activated slag-based cementless composite reinforced by polyethylene fiber," *Compos. Struct.*, vol. 172, pp. 166–172, 2017.
- [175] B. Y. Lee, C. G. Cho, H. J. Lim, J. K. Song, K. H. Yang, and V. C. Li, "Strain hardening fiber reinforced alkali-activated mortar - A feasibility study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 15–20, 2012.
- [176] S. Aydin and B. Baradan, "The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars," *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 63–69, 2013.
- [177] F. Puertas, T. Amat, A. Fernández-Jiménez, and T. Vázquez, "Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 12, pp. 2031–2036, 2003.

- [178] A. A. Azmi, M. M. A. B. Abdullah, C. M. R. Ghazali, A. Victor Sandu, and K. Hussin, "Effect of Crumb Rubber on Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Concrete," *MATEC Web Conf.*, vol. 78, pp. 4–8, 2016.
- [179] P. Shrestha, "Development Of Geopolymer Concrete For Precast Structures. Tesis de grado," The University of Texas, 2013.
- [180] Cui Xuemin; Gao Fuxin; Kuang Pizhuang; Liu Leping; He Yan; Chen Jinyu, "Geopolymer/waste rubber powder compound dry powder material and preparation method thereof," *Univ Guangxi.*, pp. 1–6, 2014.
- [181] W. Shuping, P. Xiaoqin, L. I. Chang, H. U. Can, and L. I. N. Shanwu, "Research on pavement application property of geopolymer cement mortar modified by recycled tire rubber powder," pp. 2005–2006, 2017.
- [182] M. Gandoman and M. Kokabi, "Sound barrier properties of sustainable waste rubber/geopolymer concretes," *Iran. Polym. J. English Ed.*, vol. 24, no. 2, pp. 105–112, 2015.
- [183] F. Pelisser, N. Zavarise, T. A. Longo, and A. M. Bernardin, "Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 6–7, pp. 757–763, 2011.
- [184] D. N. K. A. Mahesh H. Vaniya¹, Ankur C. Bhogayata², "A review on utilization of crumb rubber in geopolymer concrete," *Sci. J. Impact Factor E-ISSN 2348-4470 P-ISSN 2348-6406*, pp. 70–74, 2015.
- [185] Y. Park, A. Abolmaali, Y. H. Kim, and M. Ghahremannejad, "Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber partially replacing sand," *Constr. Build. Mater.*, vol. 118, pp. 43–51, 2016.
- [186] M. Esther Fernández, "Tesis Doctoral: Refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo," 2013.
- [187] R. Méndez, "Diseño de tejas prefabricadas de bajo coste que incorporan residuos industriales de carácter

- puzolánico para uso en países en vías de desarrollo. Tesis de grado,” 2009.
- [188] Bi. Mat., “Tejas de hormigón http://www.bigmatismaeltello.com/catalogo/catalogo05_02.pdf. fecha de consulta 16 mayo 2016,” 2013. .
- [189] M. Meléndez, O. Espinosa, K. Rhyner, and M. Noboa, *Un techo que cubre al mundo: La Teja de MicroConcreto (TMC)*. editado por Red ECOSUR, año 2004. 2004.
- [190] E. Standard, “En 197-1 Composition, specifications and conformity criteria for common cements,” pp. 1–29, 2000.
- [191] AENOR, “EN 196-1:2005. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas.” .
- [192] P. Chaiyapoom, S. Jiemsirilers, S. Wada, K. Hemra, and P. Thavorniti, “Preparation of geopolymer using fly ash and rice husk silica as raw materials,” vol. 4, pp. 452–468, 2011.
- [193] M. M. Tashima, L. Soriano, M. V. Borrachero, J. Monzó, C. R. Cheeseman, and J. Payá, “Alkali activation of vitreous calcium aluminosilicate derived from glass fiber waste,” *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 1, no. 3, pp. 83–93, 2012.
- [194] J. Payá, M. V. Borrachero, J. Monzó, and L. Soriano, “Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland,” *Mater. Construcción*, vol. 59, no. 296, pp. 37–52, 2009.
- [195] J. Payá, J. Monzó, M. . 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.
- [196] L. Soriano, “Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC). Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, Valencia, España,” 2007.

- [197] 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.
- [198] 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.
- [199] M. M. Tashima *et al.*, “Alkali activated materials based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): Influence of SiO₂/Na₂O and H₂O/FCC ratio on mechanical strength and microstructure,” *Fuel*, vol. 108, pp. 833–839, Jun. 2013.
- [200] S. Velázquez, “Tesis doctoral: Aplicaciones del Catalizador de Craqueo Catalítico Usado (FCC) en la Preparación de Conglomerantes Hidráulicos. Estudio de sus Propiedades Puzolánicas,” 2002.
- [201] R. M. Ferraro and A. Nanni, “Effect of off-white rice husk ash on strength, porosity, conductivity and corrosion resistance of white concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, no. 0, pp. 220–225, Jun. 2012.
- [202] S. K. Antiohos, V. G. Papadakis, and S. Tsimas, “Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 61–62, pp. 20–27, Jul. 2014.
- [203] 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. Construcción*, vol. 63, no. 311, pp. 361–375, 2013.
- [204] J. Bejarano, C. Garzón, R. Mejía de Gutiérrez, S. Delvasto, and M. Gordillo, “Obtención de soluciones de silicato de sodio a partir de cenizas de cascarilla de arroz.” II Simposio Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción, Valencia, 2010.
- [205] J. Payá, J. Monzó, M. V Borrachero, A. Mellado, and L. M. Ordoñez, “Determination of amorphous silica in rice husk

- ash by a rapid analytical method," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 2, pp. 227–231, Feb. 2001.
- [206] I. Ismail, S. A. Bernal, J. L. Provis, R. San Nicolas, S. Hamdan, and J. S. J. van Deventer, "Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 45, pp. 125–135, Jan. 2014.
- [207] N. R. Rakhimova *et al.*, "Solidification of nitrate solutions with alkali-activated slag and slag–metakaolin cements," *J. Nucl. Mater.*, vol. 457, pp. 186–195, Feb. 2015.
- [208] L. Reig, M. M. Tashima, L. Soriano, M. V. Borrachero, J. Monzó, and J. Payá, "Alkaline Activation of Ceramic Waste Materials," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 4, no. 4, pp. 729–736, 2013.
- [209] Y. P. S. Sierpe, "Reutilización de residuos de construcción en la fabricación de conglomerantes de activación alcalina. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, Valencia, España," 2016.
- [210] E. Sadot Herrera-Sosa *et al.*, "Reciclados de Llantas Automotrices y la Radiación Gamma en el Mejoramiento del Concreto," *Nelson & Hossain*, no. 2015, pp. 73–93, 2001.
- [211] F. Hernández-Olivares and G. Barluenga, "Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 1, pp. 109–117, 2004.
- [212] J. a Rossignolo and M. V. . Agnesini, "Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 3, pp. 329–334, 2002.
- [213] A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M. M. Khenfer, and M. Chabannet, "Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 5, pp. 554–564, 2005.
- [214] L. Yan, C. H. Jenkins, and R. L. Pendleton, "Polyolefin

- fiber-reinforced concrete composites. Part I. Damping and frequency characteristics," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 3, pp. 391–401, 2000.
- [215] L. Yan, C. H. Jenkins, and R. L. Pendleton, "Polyolefin fiber-reinforced concrete composites. Part II. Damping and interface debonding," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 3, pp. 403–410, 2000.
- [216] L. Zheng, X. Sharon Huo, and Y. Yuan, "Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 5, pp. 939–947, 2008.
- [217] P. L. Aranda, "Efecto de la adición de hidróxido cálcico sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2014 (vid. pág. 51)."
- [218] J. Payá, J. Monzó, and M. . Borrachero, "Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R)," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 11, pp. 1773–1779, Nov. 1999.
- [219] D. P. Bentz, C. F. Ferraris, M. A. Galler, A. S. Hansen, and J. M. Guynn, "Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement-fly ash pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 404–409, 2012.
- [220] B. Lothenbach, G. Le Saout, M. Ben Haha, R. Figi, and E. Wieland, "Hydration of a low-alkali CEM III/B-SiO₂ cement (LAC)," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 410–423, 2012.
- [221] S. H. Lee, H. J. Kim, E. Sakai, and M. Daimon, "Effect of particle size distribution of fly ash-cement system on the fluidity of cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 763–768, 2003.
- [222] D. P. Bentz, A. S. Hansen, and J. M. Guynn, "Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 8, pp. 824–831, 2011.
- [223] J. He, Y. Jie, J. Zhang, Y. Yu, and G. Zhang, "Synthesis

- and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 37, pp. 108–118, Mar. 2013.
- [224] Y. Knop, A. Peled, and R. Cohen, “Influences of limestone particle size distributions and contents on blended cement properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 71, pp. 26–34, 2014.
- [225] AENOR, “UNE 80103, determinacion de la densidad real.” 2013.
- [226] AENOR, “UNE 80220, metodos de ensayo de cemento, analisis quimico determinacion de la humedad.” 2012.
- [227] A. Rudy and Y. Gabriel, “La fabricación de morteros de activación alcalina: Tesis de Máster, Universitat Politècnica de València, Valencia, España.” 2015.
- [228] L. Reig, L. Soriano, M. V. Borrachero, J. Monzó, and J. Payá, “Influence of the activator concentration and calcium hydroxide addition on the properties of alkali-activated porcelain stoneware,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 63, pp. 214–222, Jul. 2014.
- [229] A. Fernández-Jiménez, J. G. Palomo, and F. Puertas, “Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1313–1321, Aug. 1999.
- [230] Rajesh Ghosh and Sounak Bhattacharjee, “A review study on precipitated silica and activated carbon from rice husk,” *Chem. Eng. Process Technol.*, vol. 4, no. 4, 2013.
- [231] V.R. Shelke, S. S. Bhagade, and S. A. Mandavgane, “Mesoporous silica from rice husk ash,” *Chem. React. Eng. Catal.*, vol. 5, no. 2, pp. 63–67, 2010.
- [232] A. Mellado, C. Catalán, N. Bouzón, M. V. Borrachero, J. Monzó, and J. Payá, “Carbon footprint of geopolymeric mortar: study of the contribution of the alkaline activating solution and assessment of an alternative route,” *R. Soc. Chem.*, vol. 4, pp. 23846–23852, 2014.
- [233] AENOR, “UNE-EN 491. Tejas y piezas de hormigón para

- tejados y revestimiento de muros Métodos de ensayo,” 2009.
- [234] AENOR, “UNE-EN1015-3 Metodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas),” 2000.
- [235] A. S. de Vargas, D. C. C. Dal Molin, A. C. F. Vilela, F. J. da Silva, B. Pavão, and H. Veit, “The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 6, pp. 653–660, Jul. 2011.
- [236] AENOR, “UNE-EN 490, Tejas y piezas de hormigon para tejados y revestimientos de muros.” 2012.
- [237] AENOR, “UNE - EN 12504 -4 Norma española,” pp. 0–2, 2006.
- [238] J. Payá, J. Monzó, and M. V Borrachero, “Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R): An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 11, pp. 1773–1779, Nov. 1999.
- [239] Ministerio de Fomento. Gobierno de España, “Catálogo de elementos constructivos del CTE,” vol. 3, p. 141, 2010.
- [240] M. Turki, E. Bretagne, M. J. Rouis, and M. Quéneudec, “Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 2715–2722, 2009.
- [241] E. Ganjian, M. Khorami, and A. A. Maghsoudi, “Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 5, pp. 1828–1836, 2009.
- [242] H. A. Toutanji, “The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 18, no. 2, pp. 135–139, 1996.
- [243] P. Rovnaník, “Effect of curing temperature on the

- development of hard structure of metakaolin-based geopolymer,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 7, pp. 1176–1183, Jul. 2010.
- [244] J. G. S. van Jaarsveld, J. S. J. van Deventer, and G. C. Lukey, “The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers,” *Chem. Eng. J.*, vol. 89, no. 1–3, pp. 63–73, Oct. 2002.
- [245] A. Autoriza, E. L. Uso, D. E. E. Documento, and A. G. A. S. Natural, “UNE- EN 771-2 Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería Parte 2: Piezas silicocalcáreas.” 2011.
- [246] A. Autoriza, E. L. Uso, D. E. E. Documento, and A. G. A. S. Natural, “UNE-EN 771-1 Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería Parte 1: Piezas de arcilla cocida.” 2011.
- [247] S. Erdem, A. R. Dawson, and N. H. Thom, “Impact load-induced micro-structural damage and micro-structure associated mechanical response of concrete made with different surface roughness and porosity aggregates,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 291–305, 2012.
- [248] N. Holmes, A. Browne, and C. Montague, “Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 195–204, 2014.
- [249] G. H. Ya ş ar E., Erdo ğ an H., “Determination of the thermal conductivity from physico- mechanical properties. Bulletin of Engineering Geology and the Environment , 67, p. 219-225.,” p. 2008, 2008.

Utilización de residuos de Neumáticos Fuera de Uso en conglomerantes con base cemento portland y de activación alcalina para uso en prefabricados de bajo coste económico y medioambiental
