



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE
INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA



Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS
CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN
DE LA *CORTADERIA SELLOANA* COMO POSIBLES
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**Study for the use of the ashes from the calcination of
Cortaderia selloana as possible construction material.**

Para acceder al título de:

Grado en Ingeniería de los Recursos Energéticos

Autor: Jesús Cotera Barbapolo

Director: Jesús Setién Marquínez

Convocatoria: septiembre 2019



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Agradecimientos

Me gustaría en primer lugar, mostrar mi agradecimiento al director de este estudio, Jesús Setién, por su atención y su ayuda, aportando información necesaria y resolviendo las dudas surgidas, siempre con gran claridad. También agradecerle a Pablo Tamayo su ayuda y consejos en los ensayos de laboratorio.

En segundo lugar, agradecer a mis compañeros durante estos años, en especial a Inés, por su ayuda en lo académico, pero sobre todo en lo personal.

Por último, agradecer a mis padres, Jesús y Ana María, por su preocupación durante todo este tiempo y por haber hecho que esto sea posible.



CONTENIDO

1	OBJETIVO	9
2	INTRODUCCIÓN	10
2.1	CORTADERIA SELLOANA	10
2.1.1	Características	10
2.1.2	Origen y distribución	11
2.1.2.1	Distribución en la península ibérica	12
2.1.3	Reproducción y crecimiento	13
2.1.4	Modo de expansión	14
2.1.5	Problemática	15
2.1.6	Control de expansión y erradicación	15
2.1.6.1	Métodos físicos	17
2.1.6.2	Métodos químicos.....	18
2.1.6.3	Métodos térmicos	18
2.1.7	Control de la expansión en Cantabria	18
2.1.7.1	Método I. Zonas a más de 5 metros del agua, en las que se inicia el tratamiento con herbicida, antes del verano.....	19
2.1.7.2	Método II. Zonas a más de 5 metros del agua, en las que el tratamiento con herbicida no podrá aplicarse hasta pasado el verano	19
2.1.7.3	Método III. Zona dentro de los 5 metros inmediatos al agua en las que no se llevará a cabo tratamiento con herbicida.....	19
3	METODOLOGÍA DE ENSAYO Y MATERIALES	20
3.1	CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE PLUMERO Y DE SUS CENIZAS	20
3.1.1	Análisis de termogravimetría (TGA) y calorimetría (DSC)	21
3.1.2	Observación en microscopio electrónico y análisis elemental de las muestras de plumero	23



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



3.1.3	Incineración de plumeros	25
3.1.4	Ensayo de puzolanicidad de las cenizas de plumero	27
3.1.5	Análisis por difracción de rayos X (XRD) de las cenizas de plumero.....	30
3.1.6	Observación en microscopio electrónico y análisis elemental de las cenizas 31	
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO	32
3.2.1	Densidad.....	32
3.2.2	Superficie específica Blaine	35
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA	38
3.3.1	Densidad.....	38
3.4	DOSIFICACIÓN DEL MORTERO	39
3.4.1	Cálculo del número de probetas	41
3.4.2	Procedimiento de amasado.....	42
3.4.3	Preparación y acondicionamiento de probetas.....	43
3.5	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN UNIAxIAL.....	46
3.6	OBSERVACION DE MORTEROS EN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO	48
3.7	DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS	48
3.7.1	Determinación de la densidad aparente, relativa y saturada.....	48
3.7.2	Determinación de la porosidad accesible	51
3.7.3	Determinación del coeficiente de absorción	51
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
4.1	PROPIEDADES DE LOS PLUMEROS Y SUS CENIZAS.....	52
4.1.1	Análisis de termogravimetría (TGA) y calorimetría (DSC) de los plumeros.	52
4.1.2	Microestructura de los plumeros	56
4.1.3	Composición química elemental de los plumeros.....	60
4.1.4	Composición química de la ceniza de plumero	67
4.1.5	Puzolanicidad de las cenizas.....	77
4.1.6	Difracción de Rayos X (XRD) de las cenizas de plumero.....	79
4.2	PROPIEDADES DEL CEMENTO	81



GRADO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS ENERGÉTICOS



JESÚS COTERA BARBAPOLO

4.3	PROPIEDADES DE LA ARENA	81
4.4	DOSIFICACIÓN DEL MORTERO	82
4.4.1	Número de probetas.....	84
4.5	RESISTENCIA A COMPRESIÓN UNIAXIAL	85
4.6	MICROESTRUCTURA DE LAS PROBETAS	87
4.7	PROPIEDADES FÍSICAS.....	91
5	BENEFICIO MEDIOAMBIENTAL.....	93
6	CONCLUSIONES.....	96
7	BIBLIOGRAFÍA	100



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Cortaderia selloana. Fuente: mortaradepielagos.blogspot.com	11
Figura 2.2. Mapa de la distribución de Cortaderia selloana en España. Fuente: Miteco.	13
Figura 3.1. Plumero de la Pampa. Barrio Mies Coterios. Torrelavega. FUENTE: Google maps.	20
Figura 3.2. Aparato de análisis simultáneo de termogravimetría y calorimetría del SERCAMAT de la Universidad de Cantabria. Fuente: Web Unican.....	22
Figura 3.3. Microscopio electrónico de barrido de la UC. Fuente: Web Unican.....	23
Figura 3.4. Muestras de plumero recubiertas por fina capa de oro.	24
Figura 3.5. Imagen del interior del microscopio electrónico con las muestras de plumero.....	25
Figura 3.6. Incineración de plumeros en hoguera al aire libre.	26
Figura 3.7. Cenizas de Plumero.	26
Figura 3.8. Diagrama de concentración de saturación de ion calcio en función de la concentración de iones hidroxilo a 40°C. Fuente: Norma UNE EN 196-5.	29
Figura 3.9. Difractómetro de rayos X. Fuente: Bruker.	31
Figura 3.10. Matraz de Le Chatelier.	32
Figura 3.11. Muestra de cemento.	33
Figura 3.12. Botella lavadora.....	33
Figura 3.13. Matraz de Le Chatelier con propanol y cemento.....	34
Figura 3.14. Permeabilímetro de Blaine UC.	35
Figura 3.15. Balanza de precisión con muestra de cemento.	36
Figura 3.16. Balanza de precisión con muestra de arena.	38
Figura 3.17. Matraz de Le Chatelier con agua y arena.....	39
Figura 3.18. Muestra de ceniza de Cortaderia selloana.....	40
Figura 3.19. Molde de probeta de mortero.	41
Figura 3.20. Componentes para la preparación de la amasada.....	42
Figura 3.21. Moldes de probeta cilíndrica dentro de molde de probeta prismática.	44
Figura 3.22. Probetas desmoldadas con 24 horas y etiquetadas.....	45



Figura 3.23. Probetas sumergidas en agua para su curado.	45
Figura 3.24. Corte de probetas.....	46
Figura 3.25 Pulido de probetas.	47
Figura 3.26. Prensa hidráulica utilizada en el ensayo de resistencia a compresión.	47
Figura 3.27. Tanque de vacío.	49
Figura 3.28. Probeta sumergida en suspensión dentro del agua para determinar su volumen aparente.	50
Figura 4.1. Análisis TGA-DSC en atmósfera de aire de la muestra de flor.	53
Figura 4.2 Análisis TGA-DSC en atmósfera de aire de la muestra de tallo.....	54
Figura 4.3. Análisis TGA-DSC en atmósfera de argón de la muestra de flor.	55
Figura 4.4. Análisis TGA-DSC en atmósfera de argón de la muestra de tallo.....	56
Figura 4.5. Detalle de la microestructura del tallo de plumero mediante el SEM.....	57
Figura 4.6. Detalle de la microestructura del tallo de plumero mediante el SEM en la que se aprecia el aspecto típico del tejido celular vegetal.....	57
Figura 4.7. Detalle de la microestructura del tallo de plumero mediante el SEM.....	58
Figura 4.8. Detalle de la microestructura del tallo de plumero mediante el SEM.....	58
Figura 4.9. Detalle de la microestructura de la flor de plumero mediante el SEM.....	59
Figura 4.10. Detalle de la microestructura de la flor de plumero mediante el SEM.....	59
Figura 4.11. Región de análisis 1 (Muestra 1).	60
Figura 4.12. Análisis químico región 1. Elementos.....	61
Figura 4.13. Región de análisis 2 (Muestra 1).	62
Figura 4.14. Análisis químico región 2. Elementos.....	62
Figura 4.15. Región de análisis 1 (Muestra 2).	63
Figura 4.16. Análisis químico región 1. Elementos.....	64
Figura 4.17. Región de análisis 2 (Muestra 2).	65
Figura 4.18. Análisis químico región 2. Elementos.....	65
Figura 4.19. Región de análisis 3 (Muestra 2).	66
Figura 4.20. Análisis químico región 3. Elementos.....	67



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Figura 4.21. Región de análisis 1.	68
Figura 4.22. Análisis químico región 1. Elementos.....	68
Figura 4.23. Región de análisis 2.	70
Figura 4.24. Análisis químico región 2. Elementos.....	70
Figura 4.25. Región de análisis 3.	72
Figura 4.26. Análisis químico región 3. Elementos.....	72
Figura 4.27. Región de análisis 4.	74
Figura 4.28. Análisis químico región 4. Elementos.....	74
Figura 4.29. Región de análisis 5.	76
Figura 4.30. Análisis químico región 5. Elementos.....	76
Figura 4.31. Representación gráfica de las concentraciones a 16 días de iones de [OH] ⁻ y [CaO] sobre el diagrama de concentración de saturación. Fuente: Norma UNE EN 196-5.....	78
Figura 4.32. Difractograma de la ceniza de plumero.	80
Figura 4.33. Curvas tensión-deformación de los cuatro tipos de mortero.	86
Figura 4.34. Curvas tensión-deformación de los morteros con ceniza.....	87
Figura 4.35. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.	88
Figura 4.36. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.	88
Figura 4.37. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.	89
Figura 4.38. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.	89
Figura 4.39. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.	90
Figura 4.40. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.	90
Figura 5.1. Esquema de las emisiones producidas en la fabricación del cemento. Fuente: Miteco.	94



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Proceso de amasado de mortero.	43
Tabla 4.1. Composición química de la región 1.....	61
Tabla 4.2. Composición química de la región 2.....	63
Tabla 4.3. Composición química de la región 1.....	64
Tabla 4.4. Composición química de la región 2.....	66
Tabla 4.5. Composición química de la región 3.....	67
Tabla 4.6. Composición química de la región 1.....	69
Tabla 4.7. Composición química de la región 2.....	71
Tabla 4.8. Composición química de la región 3.....	73
Tabla 4.9. Composición química de la región 4.....	75
Tabla 4.10. Composición química de la región 5.....	77
Tabla 4.11. Resultados del ensayo de puzolanidad de las cenizas.	78
Tabla 4.12. Propiedades físicas del cemento.	81
Tabla 4.13. Propiedades de la arena.	81
Tabla 4.14. Volumen de los componentes para los diferentes tipos de mortero, según la norma..	82
Tabla 4.15. Porcentaje de ceniza para cada tipo de mortero.	82
Tabla 4.16. Volumen de ceniza para cada tipo de mortero.	83
Tabla 4.17. Volumen de los componentes para los diferentes tipos de mortero.	83
Tabla 4.18. Masa de los componentes para los diferentes tipos de mortero.	84
Tabla 4.19. Resistencia a compresión uniaxial a los 28 días de edad.	85
Tabla 4.20. Propiedades físicas de los morteros.....	91
Tabla 5.1. Datos de emisiones de los principales contaminantes en la producción de clínker.	95
Tabla 6.1. Clasificación de los morteros de revoco/enlucido según su resistencia a compresión a 28 días.	96
Tabla 6.2. Aplicaciones de los adhesivos cementosos según sus características.	98
Tabla 6.3. Clasificación de los morteros autonivelantes según sus resistencias a compresión.....	98



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA *CORTADERIA SELLOANA* COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



1 OBJETIVO

La invasión de la *Cortaderia selloana* o plumero de la pampa en España supone una importante problemática medioambiental, especialmente en el norte de la península, donde es más abundante. Por este motivo, las comunidades afectadas están llevando a cabo planes de control de expansión y erradicación de esta especie.

La erradicación de la *Cortaderia* origina un gran volumen de material de desperdicio, para el cual no se conocen muchos usos prácticos. Algunos de los usos que se le ha dado hasta el día de hoy, es la obtención de celulosa a partir de las hojas de la planta o su utilización como planta medicinal, como febrífugo infantil, diurético y sudorífero.

El objetivo del presente estudio de investigación es valorar la posible utilización de las cenizas procedentes de la calcinación del plumero de la pampa como sustituto de cemento para morteros y hormigones, dando un uso práctico a los restos de la erradicación.

Para ello es necesaria la caracterización tanto de la planta, como de sus cenizas, de manera que permita conocer sus propiedades y componentes. La caracterización se llevará a cabo a través de una serie de ensayos realizados en el Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales (LADICIM) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria (UC).

Una vez realizada la completa caracterización de la *Cortaderia* y de sus cenizas, se fabricarán varios morteros con diferente porcentaje de ceniza en sustitución de cemento (25%, 50% y 75%), para posteriormente analizar sus propiedades y su comportamiento resistente frente a esfuerzos de compresión uniaxial, siempre tomando como referencia un mortero de control, fabricado con los mismos componentes, pero sin incorporación de ceniza. La fabricación de los morteros y sus ensayos se realizarán, al igual que los de los plumeros, en el LADICIM.

Obtenidos los resultados de las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de morteros, se valorará su aptitud para distintos usos.



2 INTRODUCCIÓN

2.1 CORTADERIA SELLOANA

La *Cortaderia selloana*, conocida vulgarmente como plumero, plumero de la pampa o carrizo de la pampa, entre otros nombres, es una planta perteneciente a la familia de las poáceas o gramíneas, que tiene su origen en países de América del Sur, principalmente en Argentina, Uruguay y el sur de Brasil.

En España está considerada como una especie exótica invasora, desde el año 2013, fecha desde la cual está prohibida su plantación y comercialización. Supone un grave problema ecológico, sobre todo en el norte de la Península, donde la humedad del ambiente y las suaves temperaturas, favorecen su crecimiento y reproducción, provocando un desplazamiento de las especies autóctonas y afectando gravemente a los ecosistemas, con la amenaza que ello supone a la biodiversidad. [1]

2.1.1 Características

La *Cortaderia selloana*, es una gramínea cespitosa, robusta, que crece formando grandes macollas de hasta 3,5 metros de diámetro, pudiendo alcanzar los 4 metros de altura, con unas vistosas y densas inflorescencias de hasta 1 metro de altura (Figura 2.1). Estas inflorescencias pueden ser de color blanco ligeramente plateado o crema, pudiendo variar a rosado o malva según el sexo de la planta y el estado de madurez.

Tienen hojas perennes, largas y finas, de entre 1 y 2 metros de largo y 1 y 3 centímetros de ancho. Son de color verde azulina y sus bordes son muy afilados (de ahí su nombre científico, *Cortaderia*), debiéndose manipular con cuidado.

Los ejemplares maduros, pueden llegar a producir una gran cantidad de inflorescencias. La mayoría de especies de *Cortaderia selloana* son ginodioicas, aunque también hay alguna dioica, lo que quiere decir que hay dos tipos de plantas: el primero, que tiene flores femeninas y hermafroditas, siendo funcionalmente todas femeninas, y el segundo, que tiene flores, tanto masculinas como femeninas, nacidas de tallos diferentes. En ambos casos, se forman frutos de una única semilla.

Las inflorescencias crecen en grandes y densas panículas de entre 40 y 100 centímetros de longitud. Las plantas femeninas cuentan con entre 5 y 7 flores por espiguilla, mientras que las hermafroditas, solamente entre 3 y 5. Las lemas de las flores femeninas van desde 5 hasta 12 milímetros de longitud, con largos pelos, y las de las flores femeninas desde los 10 a los 13 milímetros. [2]



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Figura 2.1. Cortaderia selloana. Fuente: morteradepielagos.blogspot.com

2.1.2 Origen y distribución

El plumero de la pampa es originario de algunas zonas extratropicales de Sudamérica, situadas entre los paralelos 30° y 40° de latitud sur. En concreto, los territorios por los que más se extiende son Argentina, Uruguay, el sur de Brasil y zonas costeras de Chile, bajo clima mediterráneo, entre los paralelos 30° y 34° de latitud sur.

Su introducción en Europa se cree que fue entre los años 1775 y 1862. En 1874 comenzó su producción comercial en Europa y EEUU y se popularizó su uso como planta ornamental. Debido a esta popularidad como planta ornamental en todo el mundo, actualmente se ha convertido en una planta exótica invasora en buena parte de este, especialmente entre los paralelos 30° y 50° de latitud norte, en países como España, Portugal, Francia, Italia, Gran Bretaña, EEUU y entre los paralelos 30° y 40° de latitud sur, en Nueva Zelanda, Australia o Sudáfrica. Se adapta con facilidad en zonas de clima oceánico, tanto de macrobioclima templado como mediterráneo, teniendo en estos últimos que ocupar suelos más húmedos para compensar el déficit de lluvias en el periodo veraniego. [2]



2.1.2.1 *Distribución en la península ibérica*

Se cree comúnmente que la *Cortaderia* llegó a España a través del puerto de Santander en torno a los años 1940, viniendo sus semillas mezcladas con los granos de cereales que se importaban desde Argentina, debido a la escasez de alimentos que se vivía, a causa de la postguerra. Desde entonces se ha expandido con rapidez, especialmente en zonas del norte de España, donde el clima suave y la humedad del ambiente favorece su crecimiento. En los años 1950, ya aparece en algunos lugares cercanos al puerto de Santander. A partir de ahí, la planta se extendió rápidamente, especialmente en terrenos abandonados y cunetas de carreteras, encontrando en estas una gran vía de expansión ya que, al paso de los vehículos, especialmente camiones, las semillas se elevan del suelo y viajan varios kilómetros, incluso en días sin presencia de viento.

Actualmente se encuentra totalmente extendida en el norte de la Península, especialmente en Cantabria, País Vasco, Asturias y Galicia, aunque también se puede encontrar de manera puntual en Cataluña, Levante y algunas provincias del interior y de Andalucía.

En el siguiente mapa (Figura 2.2) se puede ver la distribución de la *Cortaderia* en España, en cuadrículas UTM de 10x10 Km, con información aportada al MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica) por las comunidades autónomas. [1] [2]



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

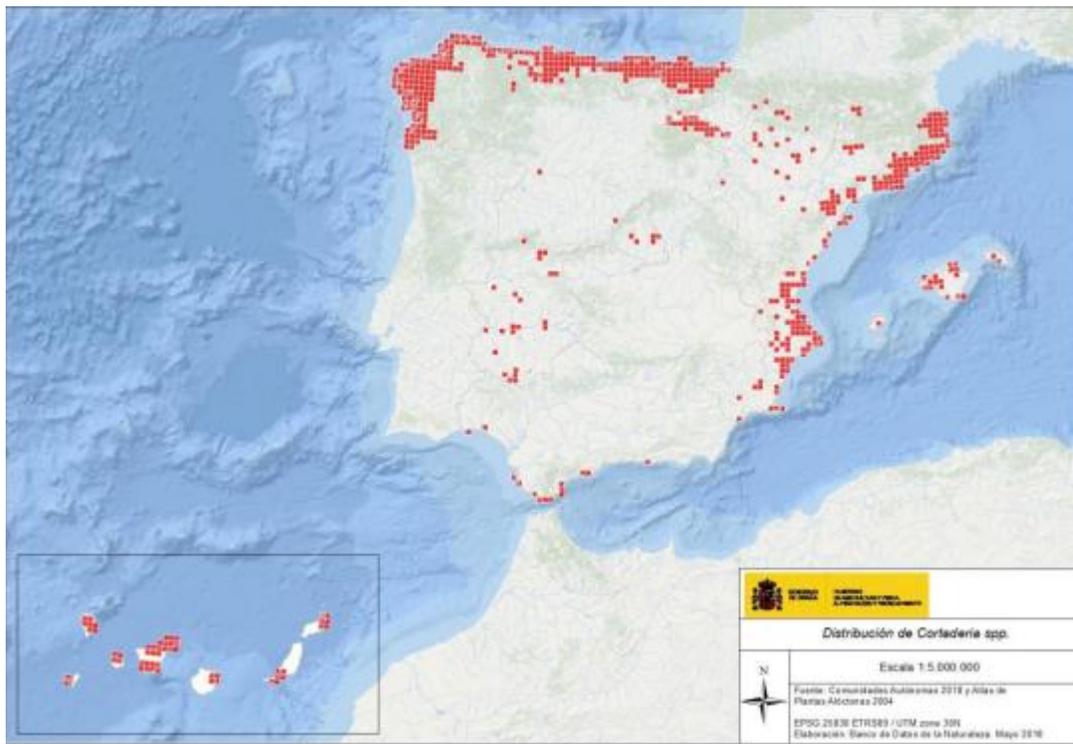


Figura 2.2. Mapa de la distribución de Cortaderia selloana en España. Fuente: Miteco.

2.1.3 Reproducción y crecimiento.

En el medio natural, los plumeros se reproducen sexualmente, produciendo flores, cuyas semillas viajan con el viento. También se pueden reproducir vegetativamente, a partir de restos de rizoma. Esto supone un problema a la hora de su erradicación ya que, si esta se hace por medios mecánicos, es necesario eliminar su estructura subterránea para impedir que rebroten.

La primera floración puede surgir al cabo de 1, 2 o 3 años desde su germinación. En el Norte de España, la floración comienza a primeros de agosto, expandiéndose hasta septiembre y durando la dispersión de semillas hasta primeros de noviembre.

Durante el invierno se produce la germinación y se establecen las plántulas. Cada inflorescencia puede llegar a producir unas 100.000 semillas, produciendo en torno a un millón de semillas cada ejemplar femenino adulto.

Los ejemplares adultos son capaces de tolerar las heladas, debido a que las yemas de crecimiento están protegidas por las grandes macollas. Las hojas secas perduran en la



planta durante todo el invierno, aislando térmicamente del exterior a las partes sensibles de la planta.

Debido a la anatomía y morfología de sus hojas, también son capaces de soportar las altas temperaturas del verano y periodos de sequía moderados.

Sus raíces se pueden extender lateralmente hasta 2 metros y hasta 3,5 metros de profundidad, ocupando volúmenes de terreno de más de 30 m². Cada planta de *Cortaderia selloana* puede vivir entre 10 y 15 años. [1] [2]

2.1.4 Modo de expansión

La invasión comienza normalmente en zonas donde se producen semillas viables, principalmente procedentes de ejemplares naturalizados, próximos a vías de comunicación. Otro caso, menos probable, es que las semillas lleguen de poblaciones alejadas, traídas por el viento o adheridas a la superficie de vehículos, ropa, calzado, etc. Como se ha visto anteriormente, cada inflorescencia produce unas 100.000 semillas, por lo que cada ejemplar femenino adulto produce una media de un millón de semillas. Estas semillas se desprenden junto a las lemas, provistas de largos pelos, lo que favorece a su transporte por acción del viento, pudiendo llegar a viajar hasta 33 Km de distancia.

Las lemas de las plantas hermafroditas, no están provistas de largos pelos, por lo que su capacidad para viajar con el viento es menor. Las semillas de *Cortaderia*, no sobreviven mucho tiempo en el suelo. Existe una importante diferencia entre la cantidad de semillas viables que producen las plantas de naturaleza femenina y las hermafroditas. Según datos del 2005, la tasa de germinación es de 71,4% para las femeninas y 14% para las hermafroditas, lo que supone una eficiencia de reproducción del orden de 17 veces mayor de las plantas femeninas sobre las hermafroditas. Por este motivo, las plantas hermafroditas, actúan funcionalmente como masculinas, es decir como donantes de polen.

El éxito de la invasión de la *Cortaderia selloana* es función, entre otras cosas, de su capacidad de germinación bajo un amplio abanico de condiciones ecológicas. Las condiciones óptimas de germinación para las semillas de *Cortaderia* son zona de sombra, suelos con alto contenido en arena y alta humedad. No obstante, es capaz de germinar en condiciones totalmente desfavorables, con sol, en suelos sin presencia de arena y con baja humedad.

En la expansión de la *Cortaderia* tienen una gran importancia las vías de comunicación, tanto carreteras y autopistas, como vías de ferrocarril, ya que no solo ofrecen un gran volumen de suelo desnudo en sus taludes y cunetas, sino que además actúan como gran vía



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA *CORTADERIA SELLOANA* COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



de expansión de las semillas, ya que estas gracias a sus estructuras pilosas, como se ha comentado anteriormente, se elevan fácilmente al paso de los vehículos, especialmente camiones, provocando su desplazamiento incluso en los días con ausencia de viento. Por este motivo, los esfuerzos en erradicar y evitar la expansión de esta planta, se centran en su mayoría en las áreas adyacentes a las principales carreteras, ya que también el movimiento de tierras en estas zonas sensibles favorece su propagación. [1] [2]

2.1.5 Problemática

Los problemas provocados por la invasión de la *Cortaderia selloana* son múltiples y complejos. Algunos de los principales inconvenientes son:

- Compite con ejemplares jóvenes de otras plantas y árboles por el agua y los nutrientes del suelo en bosques jóvenes, dificultando el establecimiento de estas y ralentizando su crecimiento
- Acumulan grandes cantidades de hoja y flor seca, lo que favorece el riesgo de incendios.
- Afecta a la biodiversidad y calidad del forraje de los pastos que invade, reduciendo el valor económico de estos y dificultando las tareas de tratamiento y explotación.
- Compite con las especies autóctonas, pudiendo llegar a desplazar a esta, especialmente en zonas húmedas.
- Altera profundamente la secuencia sucesional, provocando esto una ralentización de la evolución natural a las fases forestal y preforestal.
- Reduce el valor estético de muchas zonas naturales, afectando visiblemente a la calidad del paisaje.
- En zonas próximas a grandes poblaciones, durante el final del verano y principios de otoño, puede producir problemas alérgicos, debido a la gran cantidad de polen que genera. [1] [2]

2.1.6 Control de expansión y erradicación

Existen varios métodos de gestión para luchar contra la invasión de la *Cortaderia selloana*. En plantaciones ya establecidas, lo normal es que haya que utilizar una combinación de varios de ellos. Las metodologías a utilizar serán escogidas dependiendo de una serie de factores como la ubicación, el tamaño del núcleo poblacional, cercanía a espacios protegidos o especies amenazadas, presupuesto, etc.

Dependiendo de la época del año en que se actúe, son más indicados unos métodos u otros. El tratamiento con productos químicos, por ejemplo, será más efectivo en la época cercana



a la floración y menos efectivo durante la época de parada vegetativa. Otros métodos, como el método físico de arranque, se pueden aplicar con la misma efectividad en cualquier época del año.

Otro aspecto que condiciona la aplicación de las diferentes metodologías es la presencia de inflorescencias. Si se pretende aplicar el desbroce o el arranque de ejemplares, es recomendable eliminar previamente las inflorescencias o bien envolverlas cuidadosamente en plástico.

En función de las características de la zona invadida por la *Cortaderia selloana*, la superficie y la presencia de especies de interés de conservación, se valorará la posibilidad de llevar a cabo una erradicación total en zonas concretas o la de realizar un control que permita frenar su expansión y eliminarla de los hábitats más vulnerables. Los métodos más utilizados serán los métodos manuales y mecánicos y se priorizará la protección de espacios de interés natural, ecológico y paisajístico.

En el caso de que se trate de un foco incipiente, de plantas jóvenes, es conveniente actuar de forma rápida, mediante el arranque manual, en cuanto sea conocida su identidad. Este tipo de acciones, reducirá el coste económico, ya que no será necesario transportar la biomasa, debido a que no contiene elementos reproductores.

Si se trata de núcleos principales, con gran número de ejemplares bien establecidos, se priorizará en aquellos focos de invasión cercanos a espacios naturales protegidos o a zonas con especies protegidas o amenazadas, intentando controlar la expansión desde la periferia hasta el núcleo central, teniendo en cuenta la geografía de la zona, la orografía del terreno y los vientos predominantes en la época de floración.

A través de la experiencia se ha observado que cualquiera de estos mecanismos de control resulta insuficiente en su primera aplicación, por lo que es necesario realizar revisiones posteriores e intervenciones periódicas, hasta alcanzar los resultados deseados.

En muchas ocasiones, la forma de actuar y los objetivos se deben adaptar a un presupuesto establecido. En estos casos, se debe realizar una buena planificación de los trabajos, priorizando en las zonas más importantes y realizando el seguimiento periódico que permita cumplir los objetivos establecidos. En esta planificación, también se deberá tener en cuenta la posibilidad de algunos cambios, debidos a contratiempos, tales como meteorología desfavorable, mayor densidad real de población de la esperada, etc. [1] [2]



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA *CORTADERIA SELLOANA* COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



2.1.6.1 Métodos físicos

Dentro de los métodos físicos, se incluyen los métodos mecánicos de retirada, como el corte, arranque y desbroce, pero también otros métodos de alteración del medio físico, como el sombreado, alteración del pH, de la salinidad, e incluso otras acciones más drásticas, como el fuego controlado, el cual se ha comprobado a través de la experiencia que no mejora la situación.

El corte de los plumeros es una opción sencilla y recomendada, que requiere una continua vigilancia. Este método debe aplicarse a partir de septiembre, cuando acaba la época de floración, que es cuando más presencia de semillas hay. Para evitar la expansión de semillas, es preciso meter las inflorescencias en bolsas de plástico bien aisladas. Este método es eficaz para controlar la invasión y evitar la expansión hacia zonas no invadidas.

El arranque manual es un método habitual en especies herbáceas. Previamente al arranque de la planta, se debe asegurar la recolección de las semillas. Para evitar la dispersión de las semillas, se deben cortar los tallos floríferos de la planta e introducirlos en bolsas cerradas herméticamente. También se debe, para asegurar el éxito del método, eliminar completamente el sistema radicular de la planta. Este método es apropiado para ejemplares jóvenes o de tamaño mediano y en zonas donde no se puede aplicar tratamiento químico, debido a los daños que pueda ocasionar en otras especies de la zona. Con el objetivo de impedir el rebrote de la planta y para eliminar posibles plántulas que pudieran reaparecer, este método debe repetirse periódicamente.

Un método mecánico, que se realiza después del desbroce, es la ocultación mediante mantas antihierbas. Este método consiste en cubrir las zonas desbrozadas con una manta opaca de color negro, de manera que la ausencia de luz y el exceso de temperatura impidan la germinación de nuevas plantas. Los materiales empleados para las mantas pueden ser sintéticos u orgánicos biodegradables como la paja. Este método es apropiado en zonas donde previamente se ha cortado, en zonas de alto valor ecológico o en zonas húmedas, donde se desaconseja el uso de herbicidas. Este método requiere de revisiones periódicas de la malla, para colocar parches o realizar el mantenimiento necesario para que se mantenga en perfectas condiciones.

Un lugar donde recientemente se ha empleado con éxito este método es en la costa oeste francesa, desde Gâvres hasta Quiberon, donde se han utilizado lonas para cubrir los tocones con bordes enterrados en zanjas. El método resulta ser más eficaz si la lona se coloca antes del verano, para que el calor producido por el sol, provoque la cocción de las raíces. Es imprescindible el seguimiento de la zona, después de levantar la malla. Este método permitió la eliminación de los rebrotes de *Cortaderia selloana* y la recolonización por especies locales. [1] [2]



2.1.6.2 Métodos químicos

Siempre que sea posible, se deben usar los métodos físicos antes que los químicos. Generalmente los métodos químicos requieren de una laboriosa preparación y suelen ser llevados a cabo de manera complementaria con métodos mecánicos, como el desbroce, para aumentar la eficacia y minimizar la cantidad de herbicida a emplear.

Se debe tener en cuenta con estos métodos, que pueden tener consecuencias desfavorables a largo plazo, que generalmente no son cuantificables. Herbicidas como el glifosato son efectivos, pero tienen el inconveniente de que no son selectivos y actúan sobre otras especies, sobre todo si están situadas en humedales. Hay otros herbicidas selectivos para monocotiledóneas, como el quizalofop, pero en ocasiones se observan rebrotes de la planta en zonas que no parecían capaces de ello.

A la hora de seleccionar el producto comercial, se han de tener en cuenta los coadyuvantes, productos añadidos con el objetivo de mejorar la actividad o facilitar la aplicación, pudiendo algunos de ellos aumentar la toxicidad, como por ejemplo la tallowamina polietoxilada. Según el reglamento de Ejecución (UE) 2016/1313 de la Comisión del 1 de agosto de 2016, los productos que contengan este coadyuvante, no se pueden emplear.

Según el reglamento (CE) 1272/2008, tanto el glifosato como el quizalofop requieren una clasificación para el medio ambiente. Los datos de toxicidad, determinan que el quizalofop se clasifique con la categoría más desfavorable, peligro crónico y agudo. Para el glifosato, en cambio, los datos de toxicidad determinan que se clasifique en la segunda categoría más desfavorable, peligro crónico. Por esto, se recomienda el uso de estos productos únicamente en casos en los que sea imprescindible. Además, el uso de glifosato está prohibido, en algunos casos, a nivel provincial o autonómico. En caso de optar por el uso de otros herbicidas, se debe tener una precaución especial, dado que pueden resultar más tóxicos, al menos para los organismos acuáticos. [1] [2]

2.1.6.3 Métodos térmicos

Este método consiste en eliminar la planta a través del fuego. Puede resultar un método apropiado para la eliminación de especies anuales o perennes en fase de plántula, pero como se ha demostrado, no para eliminar plantas perennes con profundas raíces.

En el caso de la *Cortaderia*, se elimina con el fuego la parte superficial de la planta, pero esta no muere y puede llegar a rebrotar con más fuerza, si cabe, tras la quema. [1] [2]

2.1.7 Control de la expansión en Cantabria

Los trabajos de control de expansión deben planificarse en función de las propiedades particulares de cada zona. En base a esto, el Gobierno de Cantabria ha presentado tres métodos de trabajo, que abarcan las distintas situaciones que se dan en la región:



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



2.1.7.1 Método I. Zonas a más de 5 metros del agua, en las que se inicia el tratamiento con herbicida, antes del verano

Se busca con este método matar la planta por efecto del herbicida antes de que madure y libere la semilla, por lo que se ha puesto como fecha límite para su aplicación el 15 de julio.

Se aplica el caldo (Roundup Energy 2%) mediante nebulización localizada a cada plantón. La época de aplicación es entre mayo y el 15 de julio. Se deja un tiempo de actuación del herbicida, para que sea absorbido y circule por toda la planta y así pueda matarla, que dura al menos 8 semanas. Transcurrido este tiempo se trituran de manera mecánica a ras de suelo las plantas muertas y se retiran los restos de biomasa muerta. Por último, se realiza una hidrosiembra con una mezcla de un 2% en leñosas. La época de la hidrosiembra es entre septiembre y octubre. [7]

2.1.7.2 Método II. Zonas a más de 5 metros del agua, en las que el tratamiento con herbicida no podrá aplicarse hasta pasado el verano

En este caso, que no va a ser posible realizar un tratamiento con herbicida antes del 15 de julio, pero que va a ser posible realizarlo posteriormente, es necesario eliminar previamente la inflorescencia para evitar la expansión de semillas fértiles.

Se elimina la inflorescencia a finales de junio. Una vez eliminada, se aplica el tratamiento cuando sea posible, teniendo en cuenta que deberá ser antes de septiembre. A partir de aquí la metodología a seguir es igual que en el Método I, siendo la época de la hidrosiembra en febrero. [7]

2.1.7.3 Método III. Zona dentro de los 5 metros inmediatos al agua en las que no se llevará a cabo tratamiento con herbicida

En las zonas en las que no se vaya a llevar a cabo tratamiento con herbicida y solamente se vaya a llevar a cabo tratamiento mecánico, deberá realizarse antes del 15 de julio, para evitar la expansión de las semillas fértiles.

Las plantas de menos de un metro se arrancarán manualmente, mientras que, para las mayores de un metro, se utilizarán herramientas, intentando en cualquier caso arrancar el máximo posible del sistema radical de la planta. Esto se realizará antes del 15 de julio. Tras este proceso, se realiza un desbroce total y eliminación de los residuos y finalmente se procede a la hidrosiembra, al igual que en los métodos anteriores, en los meses de septiembre y octubre. [7]



3 METODOLOGÍA DE ENSAYO Y MATERIALES

En este capítulo se explica pormenorizadamente la metodología y forma de proceder de cada uno de los ensayos que intervienen en este estudio, así como las especificaciones detalladas de los materiales utilizados.

La metodología de varios de los ensayos, como los empleados en la caracterización del cemento o la arena, están basados en la aplicación directa de las normas correspondientes. En otros casos, debido a las características del material, se emplean otros métodos, desarrollados en el laboratorio.

De la misma manera, se explican los métodos utilizados en la determinación de las propiedades esenciales del mortero, desde su dosificación, proceso de amasado y curado hasta sus propiedades mecánicas (resistencia a compresión uniaxial) y físicas (densidades aparente, relativa y saturada, porosidad accesible y coeficiente de absorción).

3.1 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE PLUMERO Y DE SUS CENIZAS

Las muestras de *Cortaderia* necesarias para este estudio, han sido obtenidas en el Barrio Mies Coterios, junto a la Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía de Torrelavega, para posteriormente realizar distintos ensayos tanto a la planta, tallo y flor, como a sus cenizas.



Figura 3.1. Plumero de la Pampa. Barrio Mies Coterios. Torrelavega. FUENTE: Google maps.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



3.1.1 Análisis de termogravimetría (TGA) y calorimetría (DSC)

A través de este análisis se pretende caracterizar el comportamiento de varias propiedades con la variación de la temperatura. Las técnicas de análisis empleadas son la termogravimetría (TGA) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC), que proporcionan valores de las propiedades de pérdida de masa y de entalpía respectivamente.

El análisis termogravimétrico muestra un registro de la variación de la masa de una muestra de material, cuando es sometida a un proceso de calentamiento controlado.

Puede realizarse a temperatura constante, donde la pérdida o ganancia de masa se mide en función del tiempo, o como en este caso, a temperatura variable (10 °C/min), donde el registro puede medirse en función del tiempo o en función de la temperatura. En ambos casos, el resultado final, será lo que se conoce como un termograma o curva de descomposición térmica.

Para este análisis, se utiliza un instrumento de análisis termogravimétrico, integrado por varias partes:

-Balanza termogravimétrica. Debe ser lo suficientemente precisa para pesar muestras de entre 1 y 100 miligramos, con una precisión de 10⁻⁴ miligramos.

-Horno. En él irá el platillo con la muestra de material a ensayar y deberá ser capaz de medir desde temperatura ambiente, hasta temperaturas bastante elevadas, 1.400 °C. También, deberá ser capaz de controlar de manera muy precisa el calentamiento que va a soportar la muestra. El horno está provisto de un intercambiador de gases, que permite realizar el calentamiento en distintos tipos de atmósferas (en el caso de este estudio se han realizado medidas en aire y en una atmósfera inerte, argón).

-Sistema de gases. Los gases utilizados pueden ser de distinta naturaleza:

- Inertes: Nitrógeno, Argón
- Oxidantes: Oxígeno, Aire
- Reductores: Hidrógeno

El intercambio de gases durante el proceso de calefacción, va a permitir inducir un tipo de descomposición o reacción química diferente.

-Microprocesador. Permite el control del instrumento, así como la adquisición de los datos de las diferentes medidas.



-Software. Permite tanto el manejo del aparato, como el tratamiento posterior de los datos obtenidos.

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) evalúa el efecto de la temperatura sobre la variación de la capacidad calorífica en un material.

Una muestra de masa conocida del material a analizar, se somete a una variación de temperatura controlada y se analizan los cambios producidos en su capacidad calorífica a medida que varía el flujo de calor.

Esto permite detectar puntos de fusión, transiciones vítreas, cambios de fase y curado de manera rápida. [6] [10]



Figura 3.2. Aparato de análisis simultáneo de termogravimetría y calorimetría del SERCAMAT de la Universidad de Cantabria. Fuente: Web Unican.



3.1.2 Observación en microscopio electrónico y análisis elemental de las muestras de plumero

En este ensayo se han observado varias muestras tanto del tallo como de la flor del plumero, con el objetivo de conocer sus componentes y su estructura. Para ello se ha utilizado un microscopio electrónico de barrido.



Figura 3.3. Microscopio electrónico de barrido de la UC. Fuente: Web Unican.

El microscopio electrónico de barrido (SEM, Scanning Electron Microscopy) forma una imagen de la muestra utilizando electrones, en lugar de luz.

Para lograrlo, la máquina hace incidir sobre la muestra, colocada en su interior, un haz de electrones y mediante diferentes tipos de detectores, se recogen los electrones generados de la interacción con la superficie del material, produciendo una imagen que refleja las características superficiales de la muestra, proporcionando información sobre las formas, texturas y composición química de sus componentes.



Para facilitar la emisión de electrones, se metaliza la muestra, proceso que consiste en recubrir esta con una pequeña capa de un material conductor, ya que por su naturaleza orgánica es de por sí un aislante. Para este estudio se ha utilizado oro como elemento conductor.



Figura 3.4. Muestras de plumero recubiertas por fina capa de oro.

El haz de electrones emitido sobre la muestra, interactúa con ella y produce diversos efectos, que son medidos por los diferentes detectores:

-Electrones secundarios. Se producen cuando un electrón emitido pasa cerca del núcleo de un átomo de la muestra, proporcionando a uno o varios electrones de capas interiores la suficiente energía como para saltar fuera de la muestra. Son electrones de baja energía, por debajo de 5 eV, por lo que deben estar muy cerca de la superficie para poder escapar. Por este motivo, proporcionan imágenes de gran definición de la superficie de la muestra.

-Electrones retrodispersados. Se producen cuando un electrón del haz choca frontalmente con el núcleo de un átomo de la muestra, saliendo repelido fuera de la muestra en sentido contrario. De este modo, proporcionan información sobre la composición superficial de la muestra.

-Radiación electromagnética. Cuando un electrón secundario es expulsado del átomo, otro electrón más externo puede saltar al interior para rellenar el hueco dejado. Este desplazamiento provoca un exceso de energía, que puede ser corregido mediante la emisión de rayos X. Los rayos X son propios de cada elemento de la muestra, por lo que se



utilizan para obtener información sobre la composición química del material. Para esto es necesario que el microscopio cuente con EDX, detector de rayos X. [4] [10]

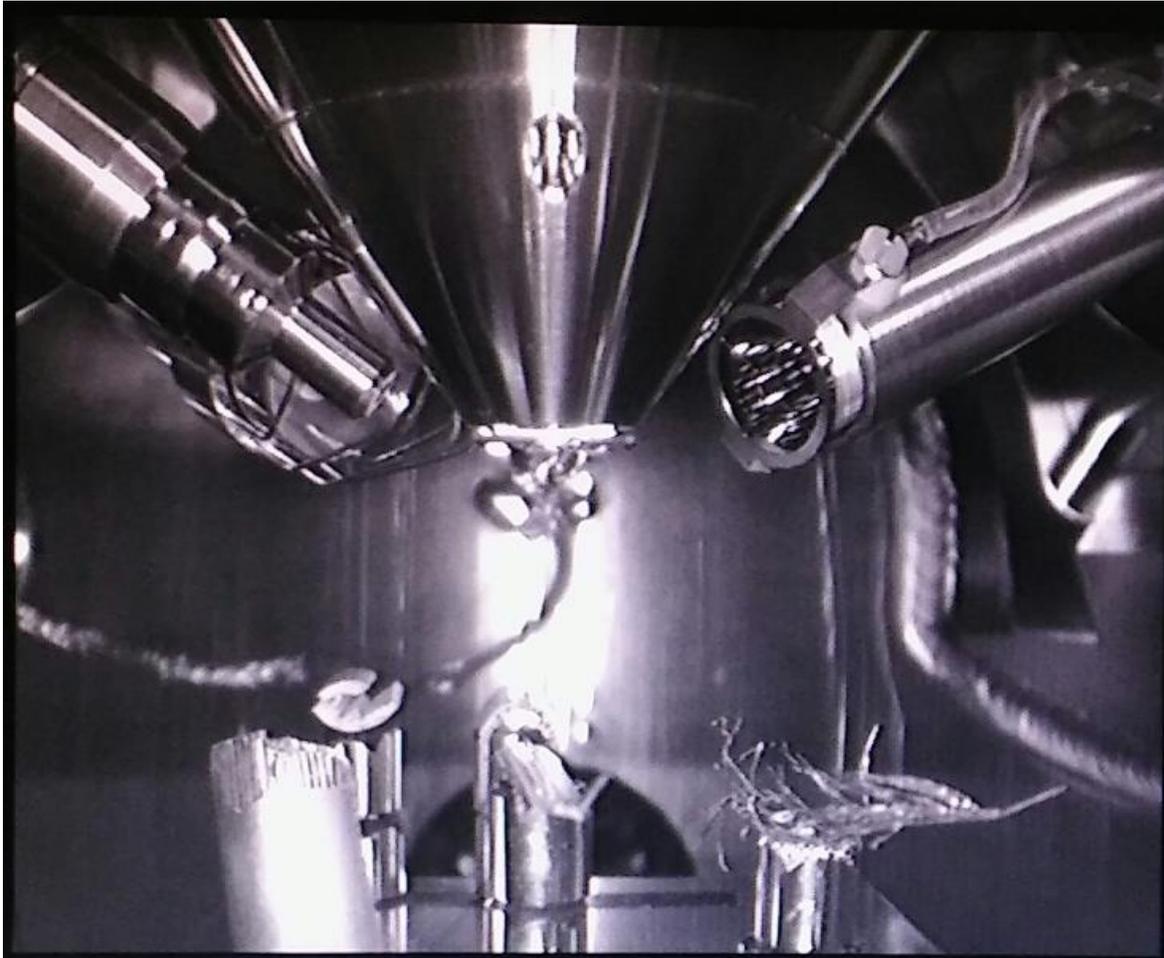


Figura 3.5. Imagen del interior del microscopio electrónico con las muestras de plumero.

3.1.3 Incineración de plumeros

Para obtener la ceniza de los plumeros es necesario incinerarlos. Debido a la ausencia de un horno apropiado para esta función, se ha optado por incinerarlos en una hoguera al aire libre sobre un recipiente metálico descubierto en la parte superior, como se muestra en las imágenes adjuntas.



Figura 3.6. Incineración de plumeros en hoguera al aire libre.



Figura 3.7. Cenizas de Plumero.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



El problema de incinerar los plumeros en una hoguera al aire libre, es que en esta se pueden alcanzar hasta unos 400 °C, temperatura que no es suficiente (como se verá en los resultados del análisis TGA) para eliminar la totalidad del contenido de carbono de los plumeros, lo que perjudica a los resultados de los ensayos posteriores, ya que este elemento no tiene propiedades cementantes.

3.1.4 Ensayo de puzolanidad de las cenizas de plumero

Para comprobar las propiedades puzolánicas de las cenizas, se ha realizado un ensayo de puzolanidad, según la norma UNE-EN 196-5. Un material con propiedades puzolánicas es capaz de cementar cuando se activa adecuadamente en presencia de determinados elementos.

Según esta norma, la puzolanidad de un material se determina comparando la concentración del ión calcio, expresado como hidróxido de calcio, que contiene una disolución acuosa en contacto con el material hidratado, transcurrido un periodo de tiempo determinado, con la cantidad de ión calcio capaz de saturar una muestra de igual alcalinidad.

Para realizar el ensayo, en primer lugar, se vierten 100 mililitros de agua recién hervida, en un recipiente cilíndrico de polietileno, con una capacidad de 500 mililitros, provisto de un tapón de estanqueidad, que evita la evaporación durante el almacenamiento. A continuación, se cierra el recipiente y se pasa a un compartimento termostático de temperatura uniforme, hasta alcanzar el equilibrio térmico. Este proceso tarda alrededor de una hora. Transcurrido este tiempo, se saca el recipiente del compartimento termostático. Se toma una pequeña muestra de las cenizas y se vierte al recipiente, utilizando un embudo para no perder material. Inmediatamente se cierra el recipiente herméticamente y se agita con fuerza durante 20 segundos aproximadamente para evitar grumos. Se coloca de nuevo el recipiente en el compartimento termostático, comprobando que está perfectamente horizontal, para obtener un espesor uniforme de la capa de ceniza depositada y se deja transcurrir un periodo de tiempo. En nuestro ensayo se ha realizado a 8 y a 16 días. Pasado este tiempo, se saca el recipiente del compartimento termostático y se procede al filtrado de la disolución a vacío sobre un embudo Buchner de porcelana, usando un papel de filtro seco, recogiendo el filtrado en un matraz. Se cierra el matraz para filtrado a vacío y se deja enfriar a temperatura ambiente. Una vez enfriado, se agita el matraz para homogeneizar el filtrado y se toma una muestra de 50 mililitros con una pipeta,



que se vierten en un vaso. Se añade un reactivo, que en nuestro caso es una disolución de naranja de metilo (dimetilaminoazobenceno p-sulfonato de sodio) con agua y se determina la alcalinidad total de la disolución con ácido clorhídrico diluido 0,1 mol/litro. La disolución valorada, se guarda para el posterior cálculo de la concentración del óxido de calcio.

La concentración en iones hidroxilo $[\text{OH}^-]$, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$[\text{OH}^-] = \frac{1000 \times 0,1 \times V_3 \times f_2}{50}$$

Siendo:

- V_3 : Volumen de la disolución de ácido clorhídrico 0,1 mol/l utilizado en la valoración (mililitros).

- f_2 : factor de disolución de ácido clorhídrico 0,1 mol/l.

$$f_2 = \frac{2 \times m_2}{105,989} \times \frac{1000}{0,1 \times V_2}$$

Siendo:

- m_2 : masa de carbonato de sodio (gramos).

- V_2 : Volumen de ácido clorhídrico utilizado en la valoración.

- 105,989: Masa molecular del carbonato de sodio.

El resultado de $[\text{OH}^-]$ se obtiene en milimoles por litro.

Para determinar la concentración de óxido de calcio, se utiliza la disolución anterior, ajustando el pH con una disolución de hidróxido de sodio. Se valora con una disolución EDTA (sal di-sodio, di-hidrato del ácido etilendiaminotetraacético) 0,03 mol/litro.

La concentración de óxido de calcio $[\text{CaO}]$, se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$[\text{CaO}] = \frac{1000 \times 0,03 \times V_4 \times f_1}{50}$$

Siendo:

- V_4 : Volumen de la disolución de EDTA utilizado en la valoración (mililitros).

- f_1 : factor de disolución de la EDTA.

$$f_1 = \frac{m_1 \times 50}{109,09 \times 0,03 \times V_1}$$



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Siendo:

- m_1 : masa de carbonato de calcio (gramos).

- V_1 : Volumen de la disolución de EDTA utilizada en la valoración (mililitros).

- 109,09: masa molecular del carbonato de calcio.

El resultado de $[CaO]$ se obtiene en milimoles por litro.

Para evaluar los resultados obtenidos, se llevan las concentraciones de iones hidroxilo y de ión calcio, expresado como óxido de calcio, en la disolución, al diagrama que se muestra en la Figura 3.8, a través de un punto.

Este diagrama representa la concentración de saturación de ión calcio en la disolución en función de la concentración de iones hidroxilo a una temperatura de 40 °C.

Las cenizas cumplirían el ensayo de puzolanicidad si el punto que se obtiene en la curva de ión calcio, queda por debajo de la curva de concentración de saturación. [8]

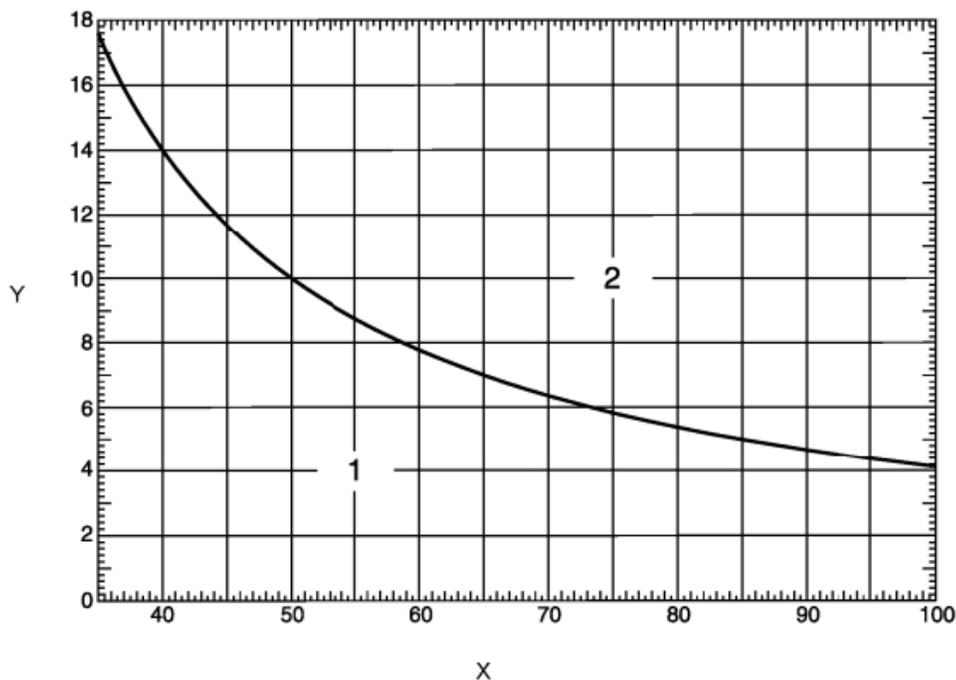


Figura 3.8. Diagrama de concentración de saturación de ion calcio en función de la concentración de iones hidroxilo a 40°C. Fuente: Norma UNE EN 196-5.



Leyenda:

- 1: Pasa
- 2: No pasa
- X: Concentración de iones hidroxilo (mmol/l)
- Y: Concentración de iones calcio (mmol/l)

3.1.5 Análisis por difracción de rayos X (XRD) de las cenizas de plumero

La difracción de rayos X (XRD) es una técnica analítica utilizada principalmente para identificar fases de un material cristalino y puede proporcionar información sobre las dimensiones de las celdas unitarias. El material analizado debe estar finamente molido y homogeneizado.

La difracción de rayos X se basa en la interferencia constructiva de rayos X monocromáticos en su interacción con una muestra del material a analizar, en este caso, la ceniza de los plumeros. Los rayos X se generan por un tubo de rayos catódicos, se filtran para producir radiación monocromática, se coliman para concentrarse y se dirigen hacia la muestra. La interacción de los rayos incidentes con la muestra produce una interferencia constructiva y pico máximo de radiación difractada, cuando las condiciones cumplen la Ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}(\theta)$$

Siendo:

- n: Número entero
- λ : Longitud de onda de los rayos X
- d: Distancia entre planos de la red cristalina
- θ : Ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión

Esta ley relaciona la longitud de onda de la radiación electromagnética con el ángulo de difracción y el interespaciado de la red en la muestra cristalina. Estos rayos X difractados son posteriormente detectados, procesados y contados.

El aparato utilizado para este ensayo se conoce como difractómetro de rayos X (Figura 3.9) y cuenta con tres elementos básicos: un tubo de rayos X, un portamuestras y un detector de rayos X.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Los rayos X se generan en un tubo de rayos catódicos calentando un filamento para producir electrones y proyectarlos hacia un objetivo, llamado anticátodo, aplicando un voltaje elevado (20 – 40 kV). Cuando los electrones proyectados tienen la suficiente energía para desalojar los electrones de la capa interna del material del anticátodo, se producen los espectros de rayos X característicos. Estos espectros constan de varios componentes, con longitudes de onda diferentes. Las longitudes de onda específicas son características del material objetivo. El filtrado, mediante láminas de cristal, es necesario para producir rayos X monocromáticos, necesarios para la difracción.



Figura 3.9. Difractómetro de rayos X. Fuente: Bruker.

Cuando la geometría de los rayos X incidentes sobre la muestra satisface la ecuación de Bragg, se produce una interferencia constructiva y se produce un pico de intensidad. Un detector registra y procesa esta señal de rayos X, enviando el resultado al monitor del ordenador. [5]

3.1.6 Observación en microscopio electrónico y análisis elemental de las cenizas

Con el propósito de conocer los componentes que forman las cenizas de los plumeros, se han observado estas en el microscopio electrónico, siguiendo el mismo procedimiento utilizado en la observación de las muestras de la planta, explicado en el apartado 3.1.2.



3.2 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO

El cemento utilizado para confeccionar morteros con ceniza de plumero es un cemento Portland CEM I 52,5 R. Este cemento tiene una elevada resistencia mecánica a todas las edades y un rápido endurecimiento, lo que le convierte en un cemento apropiado para la elaboración de prefabricados. Además de para prefabricados se recomienda su uso para hormigón de alta resistencia, hormigón en tiempo frío y para la elaboración de hormigón en masa, armado y pretensado de alta resistencia mecánica a cualquier edad. [11]

3.2.1 Densidad

La densidad del cemento utilizado en este estudio, se obtiene mediante el ensayo UNE 80103-2013. “Métodos de ensayos de cementos. Determinación de la densidad real.”, que consiste en establecer la relación entre una masa de cemento y el volumen de un líquido no reactivo (que en este caso es propanol), que esta masa de cemento desplaza en un frasco de Le Chatelier.



Figura 3.10. Matraz de Le Chatelier.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



El procedimiento del ensayo es el siguiente:

-Se toma una muestra de cemento de unos 64 gramos, con ayuda de una cucharilla. Para su medición se utiliza una balanza de precisión con una resolución de 0,01 gramos. Se anota el peso del recipiente con la muestra (peso inicial, P_i).



Figura 3.11. Muestra de cemento.

-Se llena el matraz de Le Chatelier con propanol, hasta un punto en la parte baja del cuello, entre las marcas de 0 y 1 cm^3 y se anota la medida (volumen inicial), la cual se toma observando el nivel de la parte inferior del menisco de la burbuja de aire. Para llenar el matraz con el propanol se utiliza una botella lavadora.



Figura 3.12. Botella lavadora.



-Se va introduciendo el cemento previamente pesado en el matraz, con la ayuda de una cucharilla y un embudo, en pequeñas dosis, evitando en la medida de lo posible que se formen tapones y que el cemento se adhiera a las caras interiores del matraz. Una vez introducido todo el cemento, se coloca el tapón del matraz y se mueve suavemente en círculos de manera horizontal.



Figura 3.13. Matraz de Le Chatelier con propanol y cemento.

-Al añadir adecuadamente la muestra de cemento, el nivel del líquido subirá hasta una posición en la parte graduada del cuello del matraz, debiendo anotarse esa medida (volumen final), después de que el matraz se sumerja en baño termostático y se deje reposar unos minutos. Al igual que antes, la medida se toma en la parte inferior de la burbuja de aire.

Se pesa el recipiente que contiene el cemento sobrante y se anota su valor (peso final, P_f). La diferencia de volúmenes ($V_f - V_i$), muestra el volumen que ocupa el material añadido.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



La densidad real del cemento se calcula como el incremento de masa entre el incremento de volumen:

$$d_R = (P_i - P_f)/(V_f - V_i)$$

[9] [10]

3.2.2 Superficie específica Blaine

Este ensayo está normalizado según la norma UNE-EN 196-6:2010 “Método de ensayo de cementos. Determinación de la finura”. Con él medimos la finura del cemento ya que, al ser sus partículas tan pequeñas, no puede ser medida mediante tamices. La finura es una propiedad importante, ya que influye directamente en la velocidad de hidratación del cemento.

La finura por este método se obtiene en función del tiempo que tarde en pasar un volumen determinado de aire a través de una muestra de cemento con una forma y una compacidad determinada. Para ello se utilizará el permeabilímetro de Blaine.



Figura 3.14. Permeabilímetro de Blaine UC.



El parámetro de esta medición, se expresa en cm^2 por gramo de cemento, significando esto la superficie que un gramo de cemento puede cubrir. De esta manera, cuanto mayor sea la superficie específica más fino será el cemento.

Para proceder a este ensayo, en primer lugar, se debe determinar la cantidad de la muestra de cemento a utilizar. Esta, es función de su densidad, determinada previamente, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$m = (1 - e)\rho V$$

Siendo:

- V : Volumen de la capa de material compactado a introducir en la célula de permeabilidad.
- e : Porosidad del cemento.
- ρ : Densidad del cemento.

Una vez conocida la masa de muestra necesaria, se obtiene dicha cantidad utilizando una balanza de precisión.



Figura 3.15. Balanza de precisión con muestra de cemento.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



La muestra obtenida se introduce en la célula de permeabilidad, una pieza cilíndrica metálica abierta por sus dos extremos, entre dos discos de papel de filtro, para evitar pérdidas de material, y previa colocación de un disco metálico perforado en la parte inferior. A continuación, se coloca la tapa de la célula y se presiona suavemente y haciendo un giro de 90°, hasta que encaja completamente en el interior de la célula y posteriormente se retira.

Se coloca el cilindro sobre uno de los extremos del piezómetro en forma de U, que tiene el permeabilímetro, el cual contiene aceite en su interior. El otro extremo del piezómetro está abierto a la atmósfera. Sobre el cilindro metálico se coloca un tapón de plástico, con el objetivo de generar vacío entre este y la columna de aceite.

Por el lado en que está colocado el cilindro, el piezómetro está conectado con un tubo de plástico, en cuyo extremo se encuentra un pipeteador, que permite regular la presión manualmente. De esta manera, se procede a disminuir la presión del tubo, extrayendo aire del lado del piezómetro al que está conectado, lo que provoca que suba el nivel de aceite en ese mismo lado, debiendo alcanzar el nivel marcado.

Una vez alcanzado este nivel, se cierra la llave de mariposa que conecta el tubo plástico con el piezómetro y se retira el tapón del cilindro, deshaciendo el vacío, por lo que el aceite de ese lado comenzará a descender lentamente hasta igualarse con el del otro lado, ya que ambos extremos están abiertos a la atmósfera.

La velocidad de descenso del aceite es proporcional al espacio entre partículas de la masa de cemento, que atraviesa el aire, o lo que es lo mismo a la superficie específica de esta.

Se toma el tiempo de descenso del aceite entre ambas marcas del piezómetro con un cronómetro. Se realizan tres pruebas y se hace una media aritmética entre los tres resultados. El valor obtenido, se utilizará para calcular la superficie específica de Blaine, a partir de la siguiente expresión, obteniéndose el resultado en cm^2/g :

$$S_{BLAINE} = \frac{\sqrt{e^3} \cdot k \cdot \sqrt{t}}{\rho \cdot (1 - e) \cdot \sqrt{10} \cdot \eta}$$

Siendo:

e : Porosidad del cemento.

k : Constante del aparato. En nuestro caso, $k=23,69$.

t : Media del tiempo de flujo obtenido a partir de las tres medidas.



ρ : Densidad del cemento.

η : Viscosidad del aire a la temperatura del ensayo (Pa·s).

[9] [10]

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA

La arena utilizada para este estudio es una arena procedente de la fábrica Saint-Gobain PAM, ubicada en Nueva Montaña.

3.3.1 Densidad

Para determinar la densidad real de la arena se utiliza el mismo método empleado para calcular la densidad del cemento, descrito en el punto 3.2.1, utilizando un picnómetro o matraz de Le Chatelier. En esta ocasión el líquido utilizado es agua, ya que no es necesario un líquido no reactivo, puesto que la arena no reacciona con el agua.



Figura 3.16. Balanza de precisión con muestra de arena.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Figura 3.17. Matraz de Le Chatelier con agua y arena.

3.4 DOSIFICACIÓN DEL MORTERO

Para la dosificación del mortero, se deben tener en cuenta una gran cantidad de factores, lo que hace que sea una tarea complicada definir un método válido al 100%.

En este estudio, se han probado diferentes tipos de mortero, en función del porcentaje de sustitución de cemento por ceniza de *Cortaderia*, por lo que se han considerado varias dosificaciones:

- Mortero de control: Sin presencia de cenizas. Será con el que se comparen los resultados obtenidos en los ensayos en los morteros con ceniza.
- Mortero I: Con sustitución de cemento por ceniza al 25%.
- Mortero II: Con sustitución de cemento por ceniza al 50%.
- Mortero III: Con sustitución de cemento por ceniza al 75%.

La relación ceniza/cemento, en los morteros con presencia de ceniza, se ha realizado en volumen, debido a la baja densidad de esta, con respecto a la del cemento.



La dosificación de los diferentes morteros, se ha visto limitada por la pequeña cantidad de ceniza obtenida tras la incineración de los plumeros (14 gramos). De cada uno de los diferentes morteros diseñados, se ha realizado una amasada.



Figura 3.18. Muestra de ceniza de Cortaderia selloana.

En todos los casos, las proporciones empleadas han sido las de un mortero normalizado, según la norma UNE – EN 196-1 “Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias”, donde se utilizan por cada parte de cemento en peso, tres partes de arena y media de agua. Las cantidades que establece la norma son 450 g de cemento, 1350 g de arena y 225 g de agua. Partiendo de estas cantidades, se ha obtenido el volumen correspondiente de cada componente, dividiéndolo entre sus respectivas densidades (calculadas anteriormente) y a partir de ahí se ha calculado el volumen necesario de ceniza para cada mortero (con 25%, 50% y 75% de ceniza) y el porcentaje total de ceniza que se lleva cada uno de ellos. Estos porcentajes se han aplicado al volumen de cenizas con el que se contaba para el estudio y de esta manera obtener el volumen de ceniza que consume cada mortero. Obtenidas esas cantidades, se recalculan en función de estas las cantidades de los demás componentes de los morteros, respetando siempre las proporciones iniciales.

Para calcular el volumen de ceniza obtenido, se ha hecho una estimación de su densidad, a partir de datos bibliográficos, basándonos en su semejanza con las cenizas volantes, obtenidas como subproducto de la combustión de carbón pulverizado en plantas generadoras de energía, que son uno de los materiales suplementarios más utilizados en la



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



fabricación de hormigón. La densidad de las cenizas volantes sin compactar está entre 0,54 y 0,86 g/cm³. La estimación que se ha hecho para las cenizas de *Cortaderia Selloana* es de 0,5 g/cm³.

Obtenidos los volúmenes de cada componente, para los distintos tipos de mortero, se calculan sus pesos, multiplicándolos por sus correspondientes densidades. La cantidad de agua variará en cada mortero, ya que está relacionada con la cantidad de cemento, y esta varía en cada mortero por la sustitución por ceniza.

3.4.1 Cálculo del número de probetas

Tanto para la caracterización de la resistencia a compresión uniaxial del mortero, como para la caracterización de sus propiedades físicas (densidad, absorción y porosidad), se han utilizado microprobetas cilíndricas de 2 centímetros de diámetro y 4 centímetros de altura.

Como la cantidad de material con la que se cuenta es pequeña, se hacen tantas probetas como permite el material. Para hacer un cálculo aproximado de cuantos moldes van a ser necesarios, se divide el volumen estimado de cada amasada de mortero entre el volumen aproximado de cada probeta, que son 13 cm³.

Los moldes utilizados para las probetas, son moldes cilíndricos de plástico (PVC), que constan de dos piezas simétricas, que se unen y se sujetan con cinta de carroceros.



Figura 3.19. Molde de probeta de mortero.



3.4.2 Procedimiento de amasado

El procedimiento de amasado tiene gran importancia en las características finales del mortero obtenido. Se debe asegurar en todo momento la homogeneidad de la mezcla realizada.

En el caso de este estudio, no se ha podido utilizar la amasadora de eje vertical, debido al pequeño volumen de las amasadas. Por este motivo, se ha realizado el proceso de amasado de manera manual, utilizando una varilla metálica para batir la mezcla de los distintos componentes.

Con las cantidades necesarias de cada material calculadas anteriormente, se procede al pesaje de estas. Para ello, se utiliza la balanza de precisión y un pequeño recipiente para cada material.

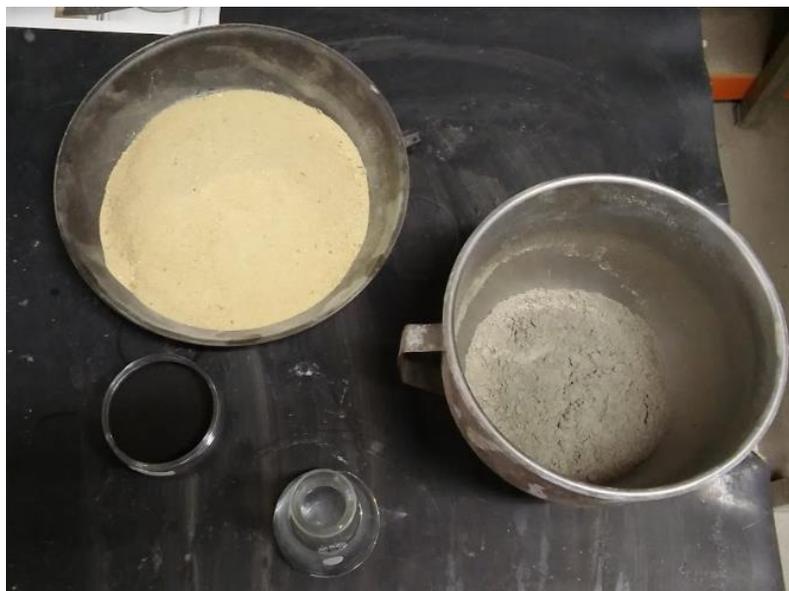


Figura 3.20. Componentes para la preparación de la amasada.

Una vez pesadas las cantidades necesarias de cada material, se procede al proceso de amasado. En primer lugar, se vierte el agua y el cemento en el recipiente en el que se va a realizar la mezcla, evitando pérdidas de ambos materiales. En el caso de que sea un mortero con porcentaje de ceniza, esta se mezcla previamente con el cemento. La pasta húmeda de



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



cemento es muy alcalina, por lo que puede producir quemaduras en la piel. Para evitar esto, se utilizan guantes de goma durante el proceso de amasado.

Inmediatamente después de que entren en contacto el agua y el cemento, se empieza a batir la muestra con la varilla metálica y se conecta el cronómetro, para batir durante 30 segundos. Transcurrido este tiempo, durante los 30 segundos siguientes, sin dejar de batir, se añade regularmente la cantidad de arena. Una vez añadida la arena, se bate durante 30 segundos más, aumentando la velocidad y se deja de amasar.

Se deja reposar la mezcla durante 90 segundos y después, se vuelve a batir durante 60 segundos a velocidad rápida.

Tabla 3.1. Proceso de amasado de mortero.

	TIEMPO	VELOCIDAD
Agua + Cemento	30 segundos	Lenta
Añadir arena	30 segundos	Lenta
Mezcla	30 segundos	Rápida
Reposo	90 segundos	-
Mezcla	60 segundos	Rápida

3.4.3 Preparación y acondicionamiento de probetas

Inmediatamente después de amasar la mezcla, se deben rellenar los moldes de las probetas. Para la compactación de las probetas se ha utilizado el método de la mesa vibradora, con el fin de eliminar la mayor cantidad de aire retenido posible. Para esto, se han introducido las probetas cilíndricas, dentro de un molde de probetas prismáticas normalizadas de mortero de 40 x 40 x 160 mm, como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 3.21. Moldes de probeta cilíndrica dentro de molde de probeta prismática.

Para evitar que se muevan durante la vibración, se ha rellenado el hueco sobrante con una pieza de cartón.

Previamente, los moldes son limpiados para evitar restos de pruebas anteriores y provistos de una finísima capa de aceite, que facilite el posterior desmoldado.

Tras este paso, el molde se coloca sobre la mesa vibradora y se ancla a esta mediante dos tornillos, para empezar con el proceso de llenado. Este proceso se realiza en dos partes. En primer lugar, se llenan las probetas hasta la mitad y se vibran durante 15 segundos. Pasado este tiempo, se para la mesa vibradora y se completa el llenado, dejando un excedente sobre las probetas y se vibra durante 120 segundos.

Una vez realizada la compactación, se enrasan las probetas con una paleta metálica, eliminando el material sobrante, y se colocan en una superficie lo más llana posible, con un trapo húmedo por encima, para permanecer así durante 24 horas.

Transcurridas 24 horas, se procede al desmoldado de las probetas, con cuidado de no dañarlas y se etiquetan, marcando en este caso el porcentaje de ceniza que contienen y el número de probeta. Al menos en una probeta de cada tipo de mortero, marcamos también la fecha del día en que fueron amasadas.



**ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS
CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN
DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO
POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**



Figura 3.22. Probetas desmoldadas con 24 horas y etiquetadas.

Una vez desmoldadas y etiquetadas, se procede al curado de las probetas, sumergiéndolas en un recipiente con agua a temperatura ambiente, quedando estas totalmente sumergidas. Así permanecerán durante 28 días, a contar desde la fecha de amasado, para después realizar los ensayos físicos y mecánicos.

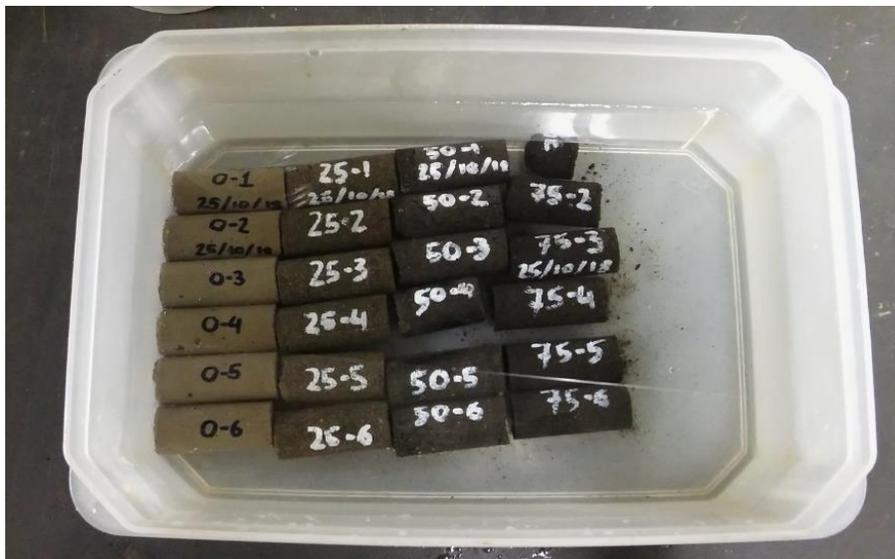


Figura 3.23. Probetas sumergidas en agua para su curado.



3.5 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN UNIAXIAL

Con el propósito de ver la influencia que tiene la presencia de ceniza como sustituto del cemento en el mortero, se realizan ensayos de compresión uniaxial a las diferentes probetas. Se realiza el ensayo en las probetas de referencia y posteriormente en las probetas con diferentes porcentajes de remplazo de ceniza, para ver como varía la resistencia de estas con respecto a las de referencia, en función del porcentaje de ceniza. Se realiza el ensayo en tres probetas de cada tipo de mortero, registrando sus resultados.

Con el objetivo de lograr una superficie de carga uniforme y paralela entre las caras superior e inferior de las probetas, se corta una mínima parte de la zona superior de la probeta con una cortadora de precisión que cuenta con una sierra de disco circular de diamante y esta refrigerada por agua. En el mismo eje de esta máquina, por el otro lado, se encuentra un disco metálico, que se utiliza para pulir y dejar completamente lisas las probetas.



Figura 3.24. Corte de probetas.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Figura 3.25 Pulido de probetas.

Para llevar a cabo los ensayos mecánicos, se ha utilizado una prensa hidráulica, aplicándole a todas las probetas la carga de manera lineal, hasta su rotura.



Figura 3.26. Prensa hidráulica utilizada en el ensayo de resistencia a compresión.



Para calcular la resistencia a compresión del mortero, se utiliza la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{F}{S}$$

Donde:

- F : Carga máxima soportada por la probeta, expresada en Newtons.
- S : Superficie de aplicación de la carga, expresada en mm^2 .
- R_c : Resistencia a compresión de la probeta, obtenida en MPa.

3.6 OBSERVACION DE MORTEROS EN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO

La observación de la apariencia microestructural de los morteros en el SEM permitirá extraer conclusiones sobre la homogeneidad de los mismos y sobre si su estructura está bien cohesionada y es cerrada, o por el contrario es una estructura abierta y fisurada, lo cual penalizaría su rendimiento mecánico.

3.7 DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

En cuanto a las propiedades físicas del mortero, se han medido las densidades aparente, relativa y saturada, así como la porosidad accesible y el coeficiente de absorción.

Para ello, se han utilizado al menos dos probetas de cada tipo de mortero, salvo en el caso de sustitución con 75% de ceniza, que solo se utilizó una, debido a que fue la única que quedó en buen estado, tras emplear las demás en el ensayo mecánico.

Para el cálculo de estas propiedades, se necesita definir y obtener previamente algunos parámetros.

3.7.1 Determinación de la densidad aparente, relativa y saturada

Para calcular la densidad aparente, se precisa conocer el valor del peso seco y el volumen aparente de la muestra.

El peso seco se obtiene secando las probetas en una estufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$ hasta peso constante, entendiendo por peso constante cuando la diferencia relativa entre dos pesadas consecutivas es inferior a $1/1000$.

Para el cálculo del volumen aparente se ha utilizado el método de inmersión de las probetas en balanza hidrostática, en condiciones de saturación. Para ello en primer lugar, se han



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



sometido las probetas a un estado de vacío, introduciéndolas en un tanque estanco, durante 24 horas, con el objetivo de extraer todo el aire de sus poros accesibles. Posteriormente se ha llenado el recipiente con agua para saturar los poros, proceso favorecido por la sobrepresión creada por el vacío. En estas condiciones han estado durante 24 horas. Finalmente, se han mantenido sumergidas en agua durante otras 24 horas a presión atmosférica. Transcurridas las 72 horas que dura este proceso, se secan superficialmente las muestras con un paño y se pesan, obteniendo así el peso saturado con superficie seca (P_{SSS}).



Figura 3.27. Tanque de vacío.

Una vez pesadas, se sumergen en agua suspendidas por un hilo de nylon para determinar el volumen aparente, según el principio de Arquímedes. Para esto se utiliza una balanza, tarada con un recipiente de agua, en el cual se van introduciendo las muestras, cuidando



que no toquen ni las paredes ni el fondo del recipiente. Asumiendo que la densidad del agua utilizada es de 1 g/cm^3 , se tiene que el valor del volumen aparente es igual al del peso obtenido en la balanza hidrostática.

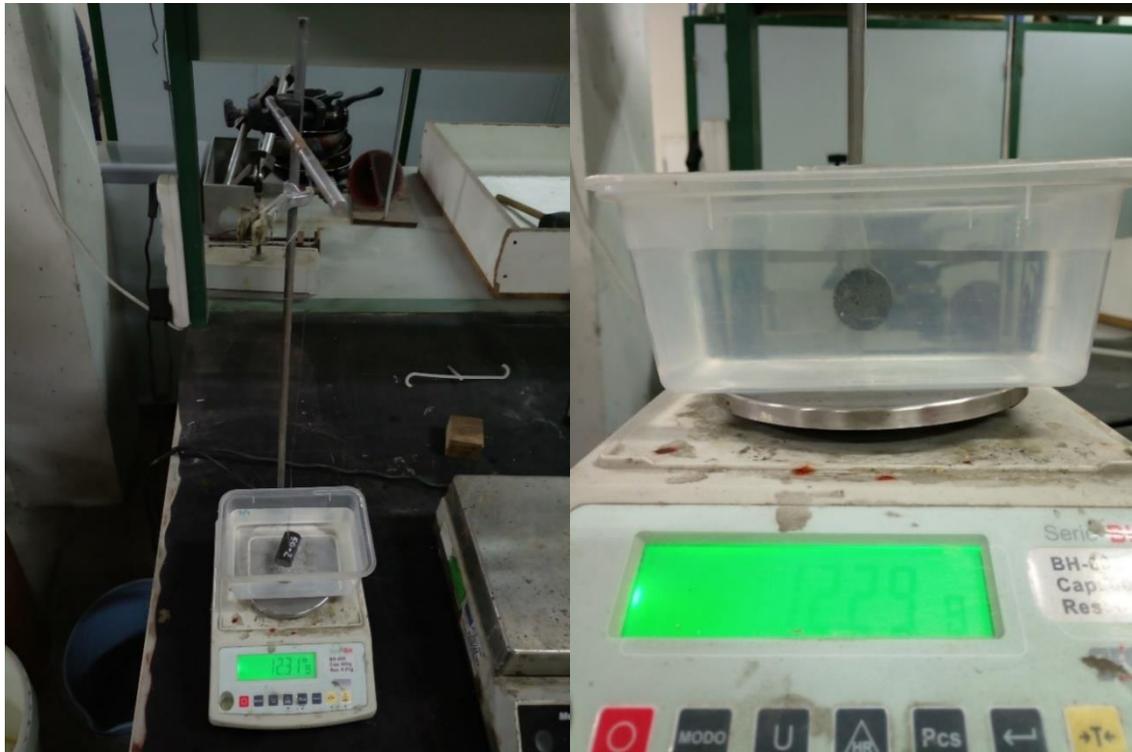


Figura 3.28. Probeta sumergida en suspensión dentro del agua para determinar su volumen aparente.

Con estos datos, ya se puede calcular el valor de la densidad aparente, mediante la siguiente fórmula:

$$d_A = \frac{P_S}{V_A}$$

Para determinar la densidad relativa se debe conocer el peso seco y el volumen relativo (V_R). Este se calcula por la diferencia entre el volumen aparente y el volumen de poros accesibles.

El volumen de poros accesibles (h_A) se calcula mediante la diferencia entre el peso saturado con superficie seca y el peso seco de la muestra.

$$h_A = P_{SSS} - P_S$$



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Luego:

$$V_R = V_A - h_A$$

Conocidos estos datos, se obtiene el valor de la densidad relativa mediante la siguiente fórmula:

$$d_R = \frac{P_S}{V_R}$$

Con los datos obtenidos, también se puede determinar el valor de la densidad saturada, que es la relación entre el peso saturado de la muestra con superficie seca y su volumen aparente:

$$d_S = \frac{P_{SSS}}{V_A}$$

[9] [10]

3.7.2 Determinación de la porosidad accesible

La porosidad accesible es una manera de expresar la capacidad de absorción del material. Se calcula mediante la relación entre el volumen de poros accesibles y el volumen aparente de la muestra, expresada en tanto por ciento.

$$Porosidad = \frac{h_A}{V_A} 100$$

[9] [10]

3.7.3 Determinación del coeficiente de absorción

La capacidad de absorción de agua de las muestras se determina valorando el volumen de poros que se ha llegado a saturar por el procedimiento descrito en el apartado 3.7.1. Conocidos el volumen de poros accesibles y el peso seco de la muestra, el coeficiente de absorción se calcula mediante la siguiente fórmula, expresada en tanto por ciento de peso:

$$Absorción = \frac{h_A}{P_S} 100$$

[9] [10]



4 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

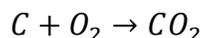
4.1 PROPIEDADES DE LOS PLUMEROS Y SUS CENIZAS

4.1.1 Análisis de termogravimetría (TGA) y calorimetría (DSC) de los plumeros

A continuación, se representan los registros de termogravimetría y calorimetría obtenidos para las muestras de flor y tallo de los plumeros, realizados en atmósferas de aire y argón respectivamente, aplicando un calentamiento de 10 °C/min. Se indican las pérdidas de masa observadas en diferentes intervalos, representadas con la línea verde.

Para los ensayos en atmósfera de aire se ve una gran pérdida de masa, por encima del 90%, tanto en el caso de la flor, como en el del tallo.

En el caso de la flor, se aprecia una primera caída de la gráfica, desde la temperatura inicial hasta aproximadamente 100 °C, produciéndose una pérdida de masa del 9,13%, correspondiente al agua contenida en la muestra en forma de humedad. Después la gráfica se estabiliza, hasta aproximadamente los 250 °C, donde se produce otra gran pérdida de masa, hasta alrededor de los 350 °C, perdiéndose cerca del 60% de la muestra. Esta pérdida de masa, probablemente corresponderá con el agua combinada de la muestra. El agua combinada es agua en combinación molecular con otros compuestos. Es difícil saber cómo se comportan las muestras de plumero en los ensayos TGA y DSC, ya que no hay referencias de ensayos anteriores. Después de esta, se produce la última gran pérdida de masa, desde aproximadamente los 350 °C, hasta los 575 °C, donde se pierde más del 95% de la masa. Esta última gran pérdida corresponde a la eliminación del Carbono, que es el componente mayoritario de los plumeros, como se verá después en los resultados de microscopio electrónico. En la combustión del carbono, se produce dióxido de carbono, que se libera a la atmósfera.



A partir de ahí, hasta los 1000 °C, ya no se aprecia apenas pérdida de masa.

Respecto a la muestra del tallo, la gráfica es muy similar a la de la flor. Se pierde en primer lugar un 7,69% correspondiente a la humedad de la muestra, desde la temperatura ambiente hasta los 100 °C. Después, entre aproximadamente los 250 °C y 350 °C, se pierde hasta el 60% de masa, en agua combinada y desde alrededor de los 350 °C hasta los 532 °C, se produce la descarbonatación, superando el 96% del total de la masa.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Para las dos muestras, tallo y flor, en el ensayo DSC, se observan dos grandes picos exotérmicos, asociados a los procesos de eliminación del agua combinada y del carbono. Esto quiere decir que se produce una liberación de energía al ambiente en forma de calor.

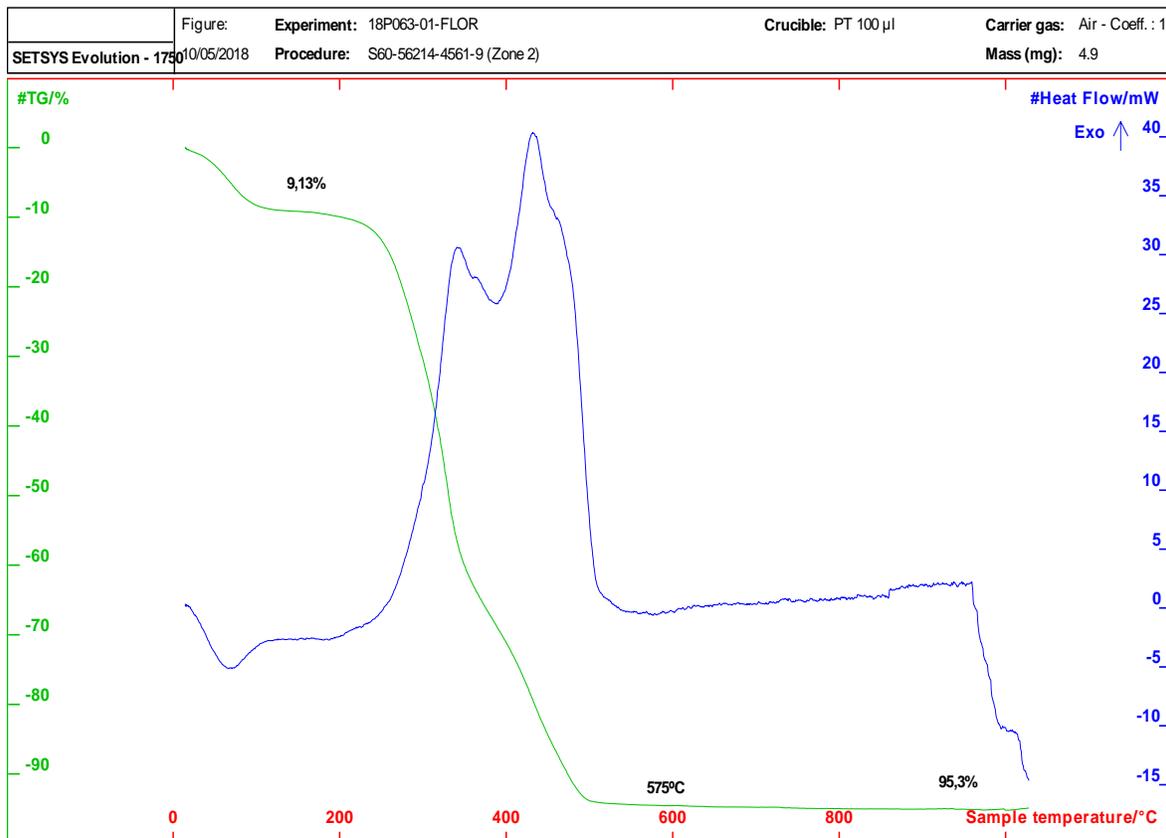


Figura 4.1. Análisis TGA-DSC en atmósfera de aire de la muestra de flor.

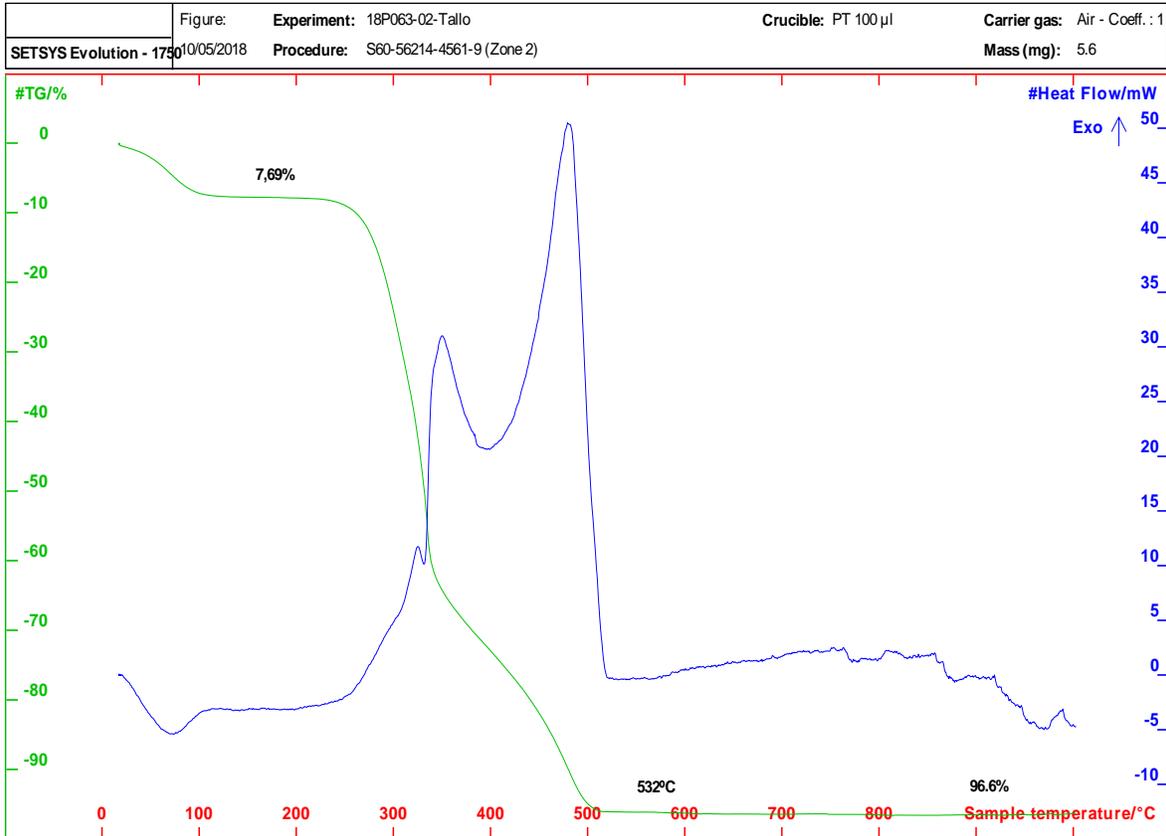


Figura 4.2 Análisis TGA-DSC en atmósfera de aire de la muestra de tallo.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



En el caso de los ensayos realizados en atmósfera de Argón, se produce una pérdida de masa constante, sin que se estabilice a la temperatura de finalización del ensayo, 1000 °C.

En el ensayo DSC, sobretodo en la muestra de flor, se observa un gran pico endotérmico, asociado a la evaporación del agua combinada de las muestras. Esta reacción absorbe energía, normalmente en forma de calor.

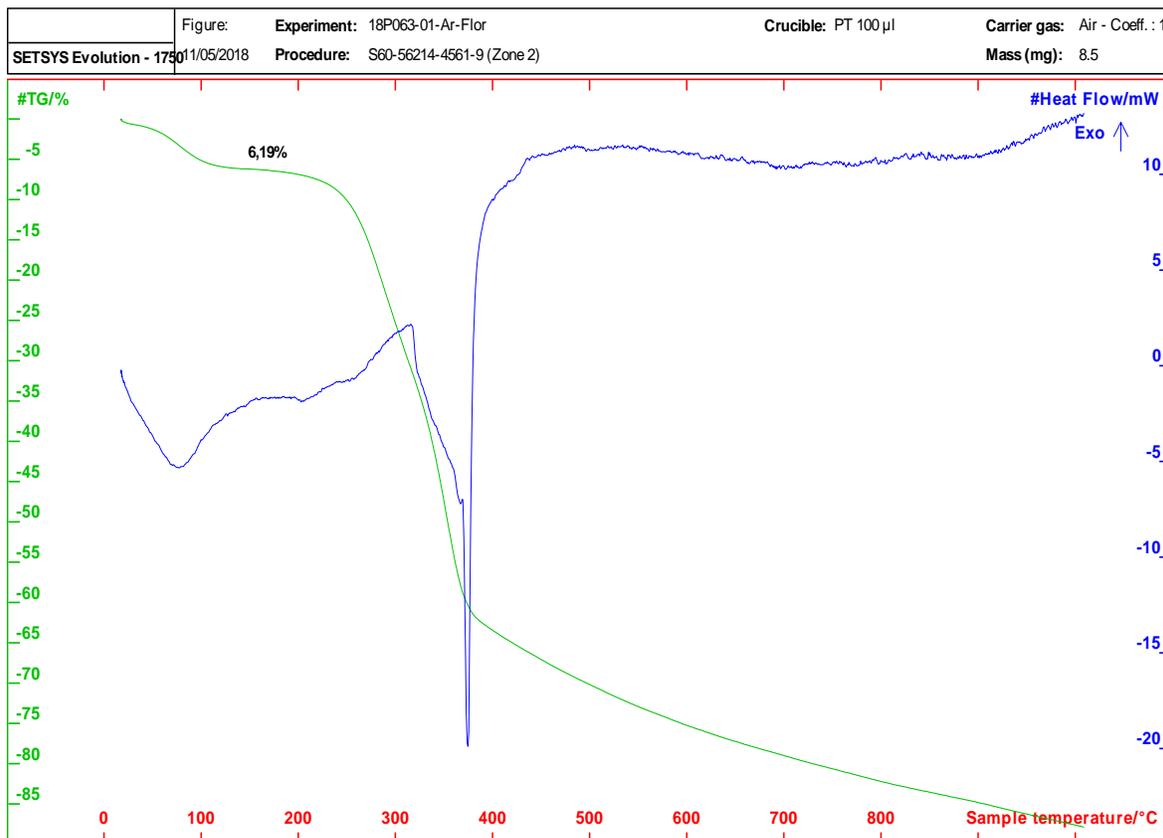


Figura 4.3. Análisis TGA-DSC en atmósfera de argón de la muestra de flor.

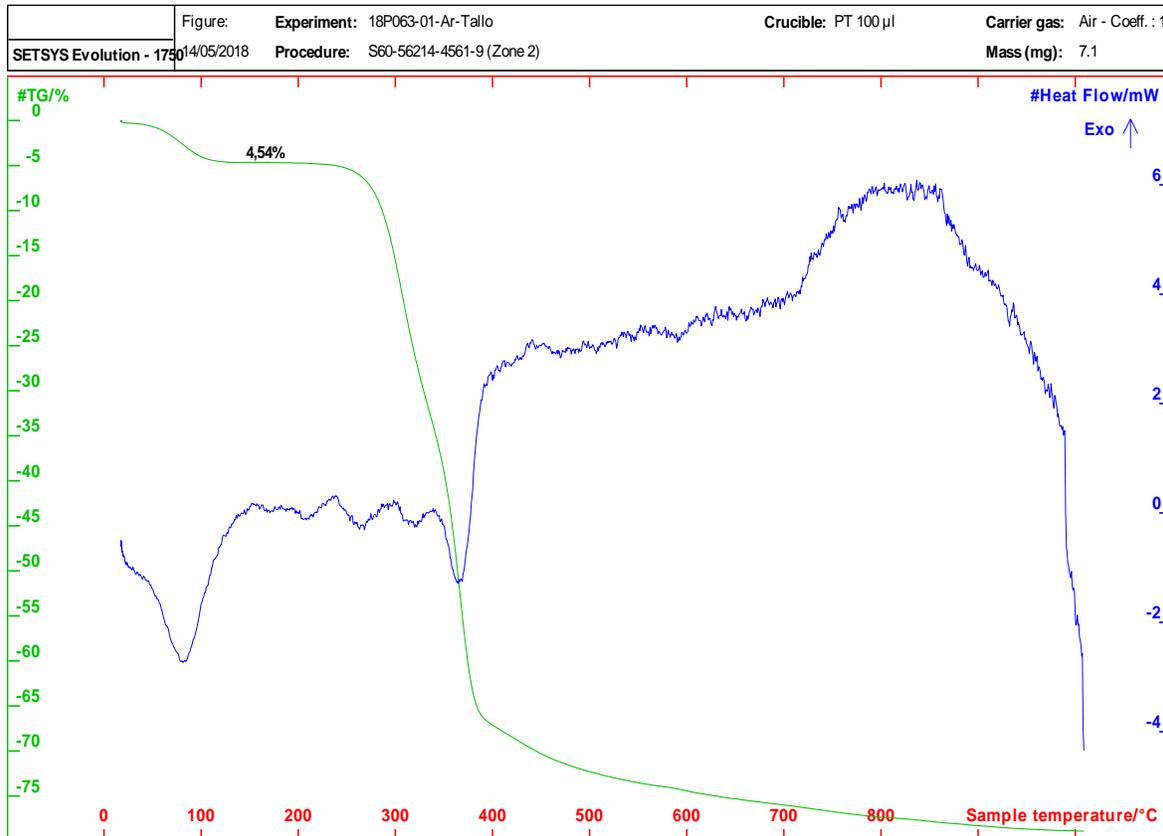


Figura 4.4. Análisis TGA-DSC en atmósfera de argón de la muestra de tallo.

4.1.2 Microestructura de los plumeros

Las imágenes ofrecidas por el microscopio electrónico de barrido (SEM), permiten observar los componentes principales de la superficie de los plumeros y su morfología. Tanto en las imágenes del tallo, como de la flor, se puede observar que la superficie es homogénea. Esto se debe a que mayoritariamente están compuestos de Carbono, componente fundamental de los compuestos orgánicos.

Las imágenes del interior del tallo, muestran una superficie en forma de malla, mientras que, en la parte exterior, se alternan franjas de una superficie lisa con otra más rugosa.

Las imágenes de la flor, muestran un aspecto fibroso, típico de los materiales de origen vegetal.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

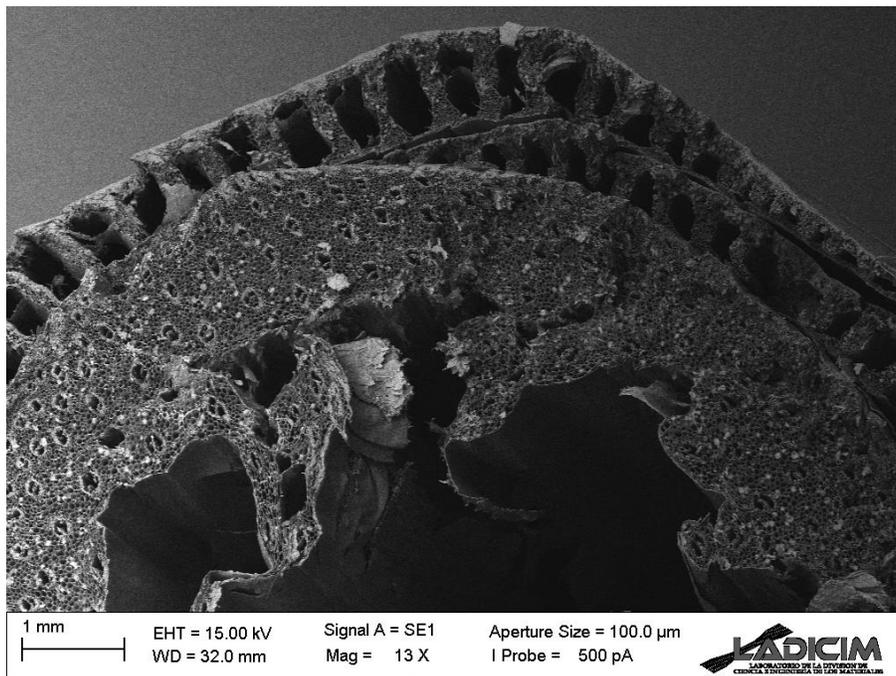


Figura 4.5. Detalle de la microestructura del tallo de plumeo mediante el SEM.

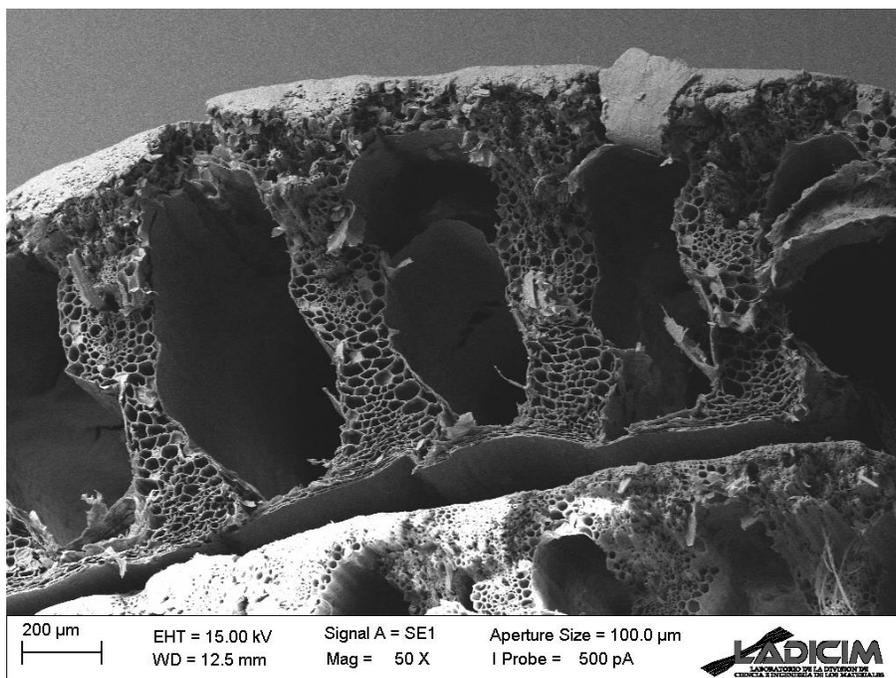


Figura 4.6. Detalle de la microestructura del tallo de plumeo mediante el SEM en la que se aprecia el aspecto típico del tejido celular vegetal.

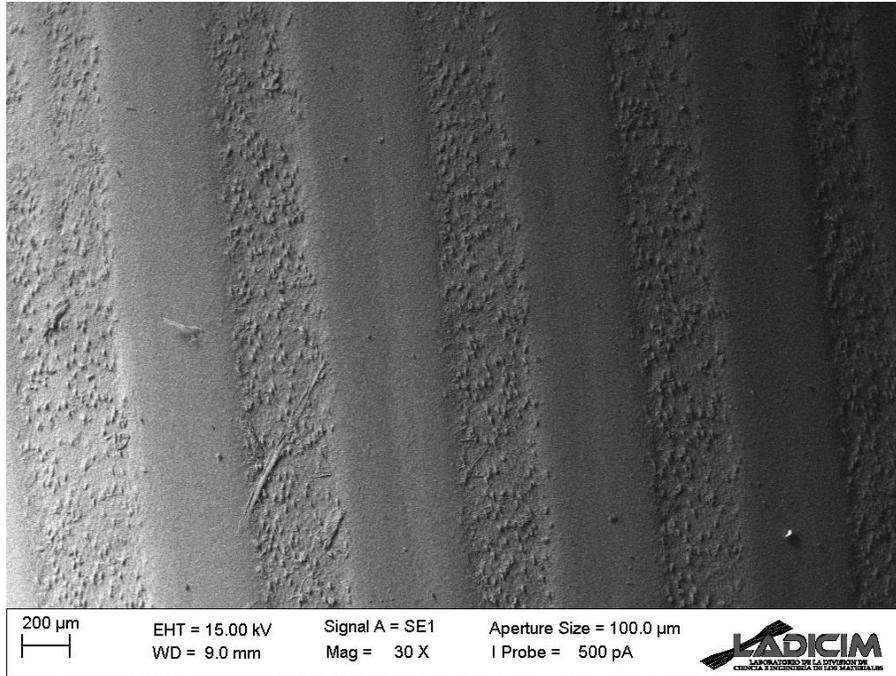


Figura 4.7. Detalle de la microestructura del tallo de plumero mediante el SEM.

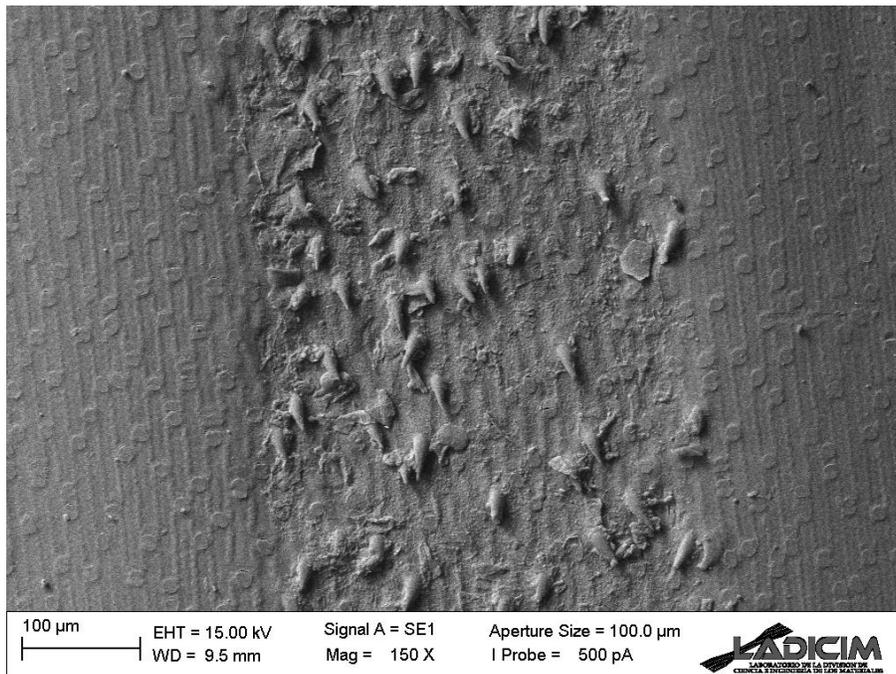


Figura 4.8. Detalle de la microestructura del tallo de plumero mediante el SEM.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS
CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN
DE LA *CORTADERIA SELLOANA* COMO
POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

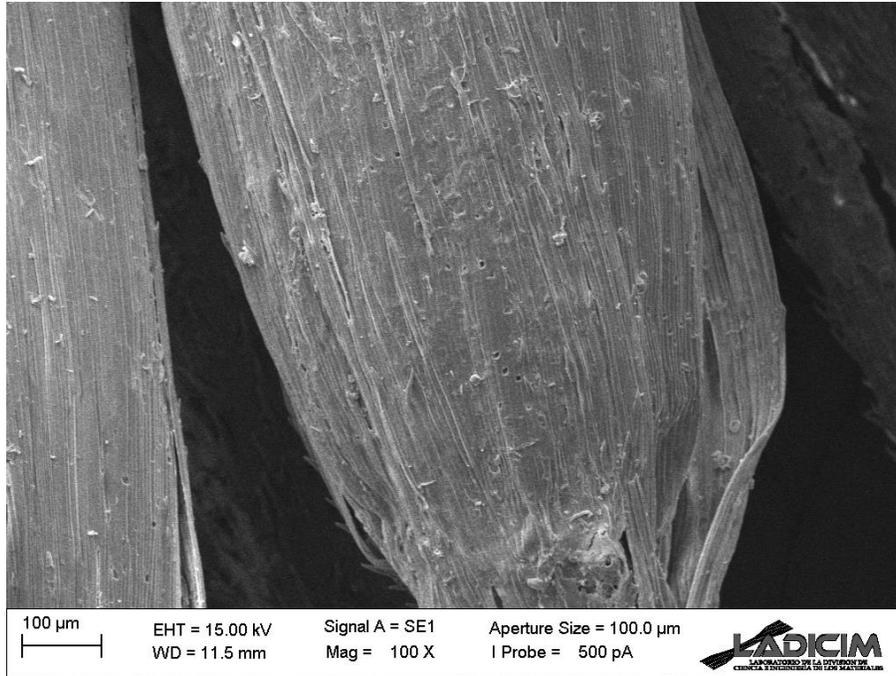


Figura 4.9. Detalle de la microestructura de la flor de plumero mediante el SEM.



Figura 4.10. Detalle de la microestructura de la flor de plumero mediante el SEM.



4.1.3 Composición química elemental de los plumeros

En todas las muestras observadas en el microscopio electrónico se observa que los componentes mayoritarios son el carbono y el oxígeno, debido a que se trata de un material orgánico, pero también se observan en algunos casos trazas de otros componentes como aluminio, magnesio, silicio, azufre y sodio, algunos de los cuales como el aluminio y el silicio pueden presentar propiedades cementantes bajo ciertas condiciones.

A continuación, se muestran los componentes de las distintas muestras:

Muestra 1:

El espectro ofrecido por el SEM para la región 1 de análisis, muestra solo contenido en carbono y oxígeno.

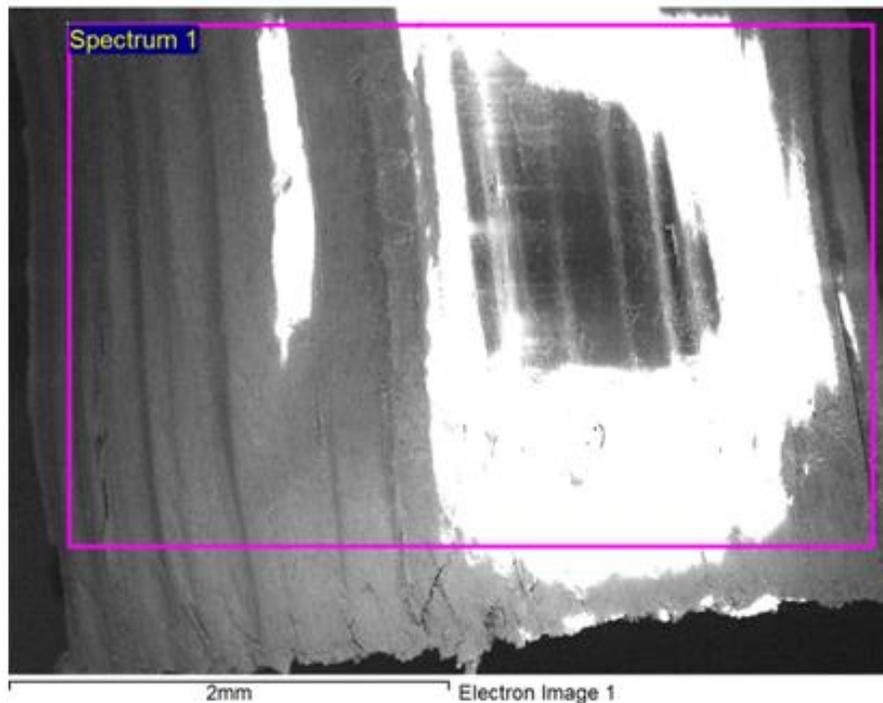


Figura 4.11. Región de análisis 1 (Muestra 1).



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

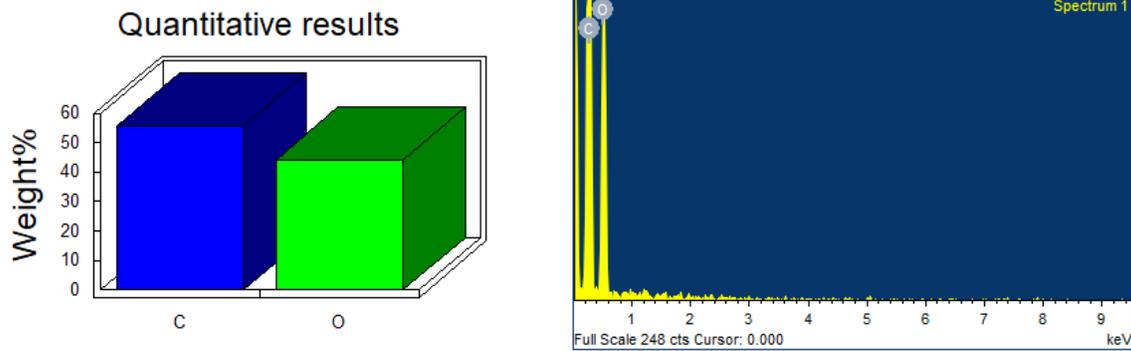


Figura 4.12. Análisis químico región 1. Elementos.

Tabla 4.1. Composición química de la región 1.

ELEMENTO	PESO(%)	ATÓMICO(%)
C	55,77	62,68
O	44,23	37,32



En el espectro mostrado de la región de análisis 2, se pueden observar, además de un alto contenido en carbono y oxígeno, como en el caso anterior, trazas de aluminio.

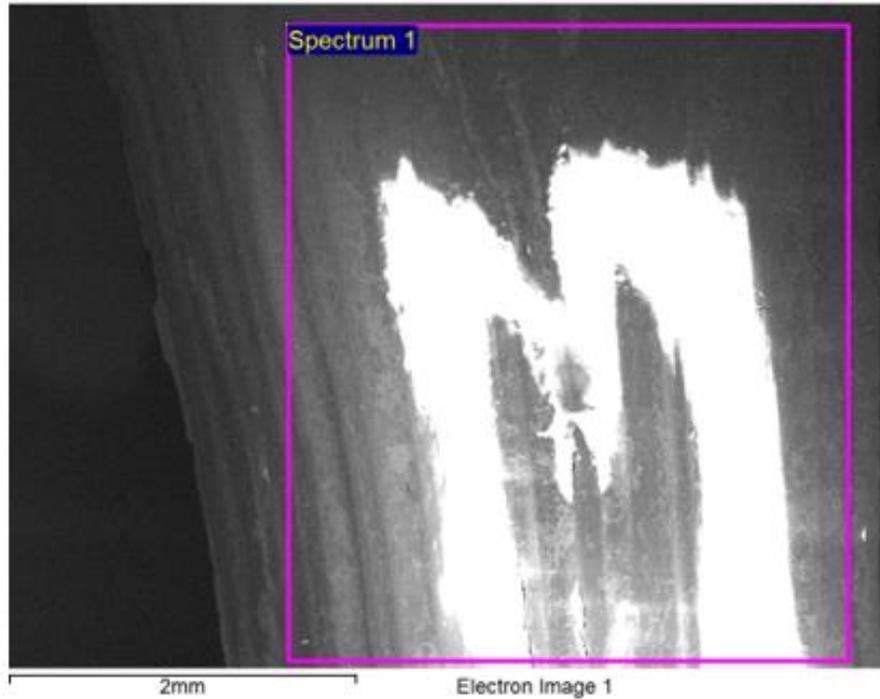


Figura 4.13. Región de análisis 2 (Muestra 1).

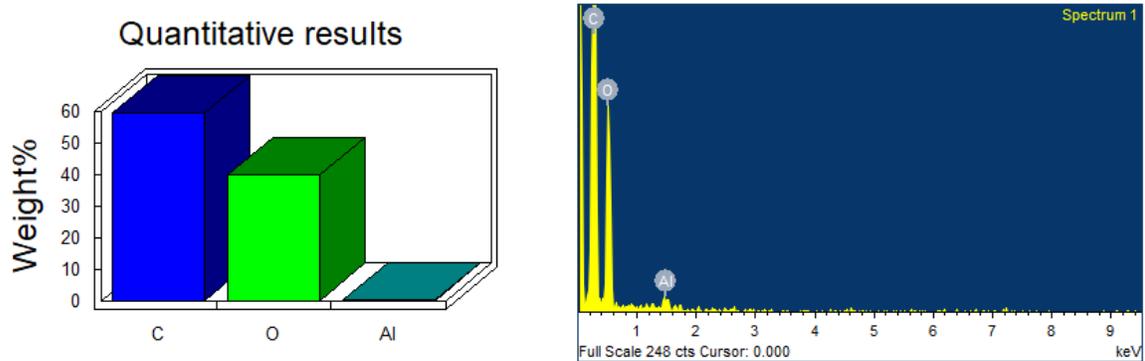


Figura 4.14. Análisis químico región 2. Elementos.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Tabla 4.2. Composición química de la región 2.

ELEMENTO	PESO(%)	ATÓMICO(%)
C	59,54	66,33
O	39,97	33,43
Al	0,49	0,24

Muestra 2:

En el espectro mostrado por el SEM de la región 1 de la segunda muestra de plumero, se observan trazas de más elementos que en los anteriores. Además de la gran presencia de carbono y oxígeno, se observan pequeñas trazas de magnesio, silicio y azufre.

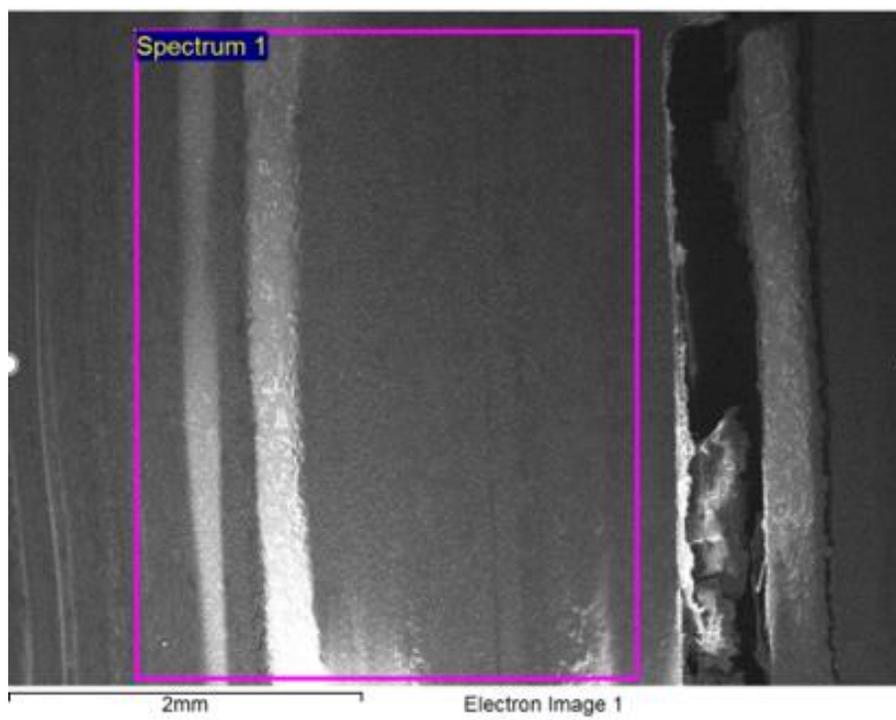


Figura 4.15. Región de análisis 1 (Muestra 2).

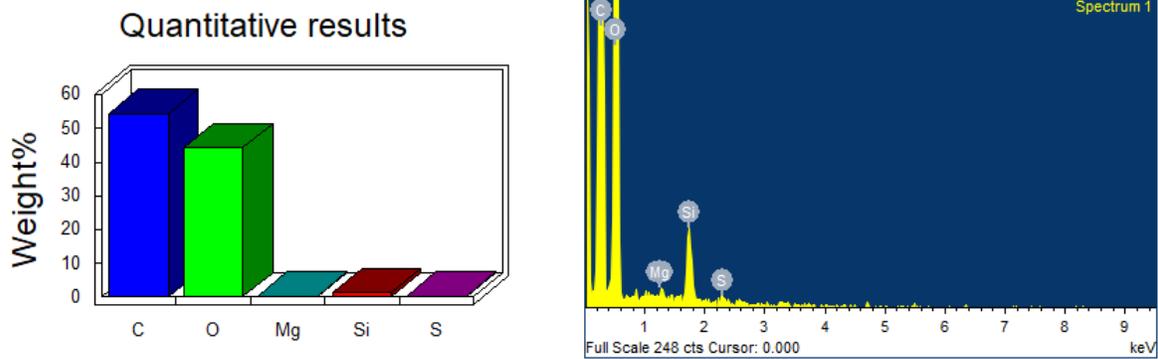


Figura 4.16. Análisis químico región 1. Elementos.

Tabla 4.3. Composición química de la región 1.

ELEMENTO	PESO(%)	ATÓMICO(%)
C	54,40	61,70
O	44,16	37,60
Mg	0,10	0,05
Si	1,25	0,60
S	0,10	0,04



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



En el espectro de la región de análisis 2 de la segunda muestra aparece, además de carbono y oxígeno y trazas de magnesio y silicio como en el espectro anterior, trazas de sodio.

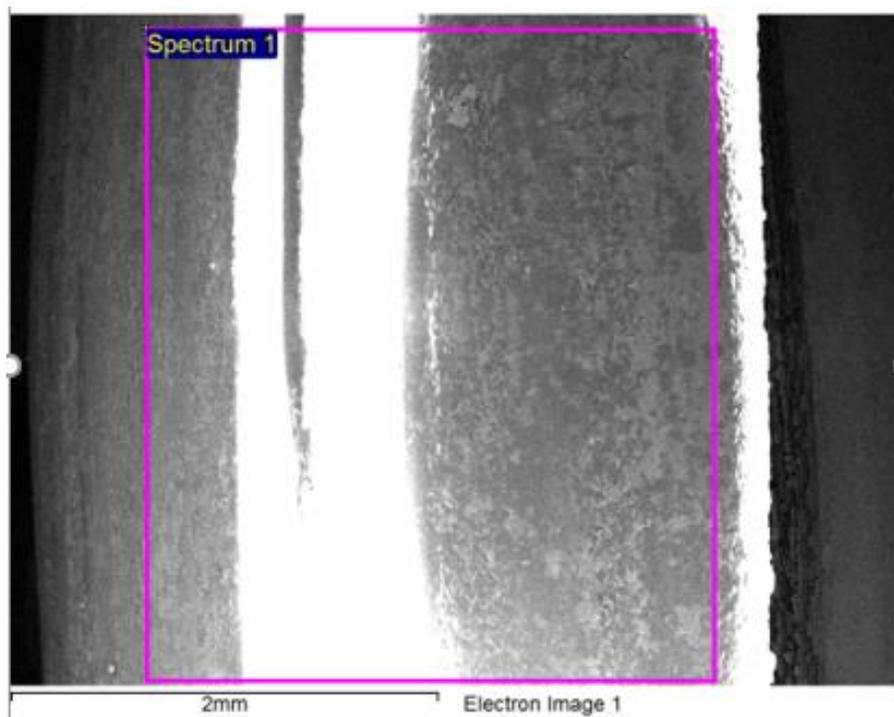


Figura 4.17. Región de análisis 2 (Muestra 2).

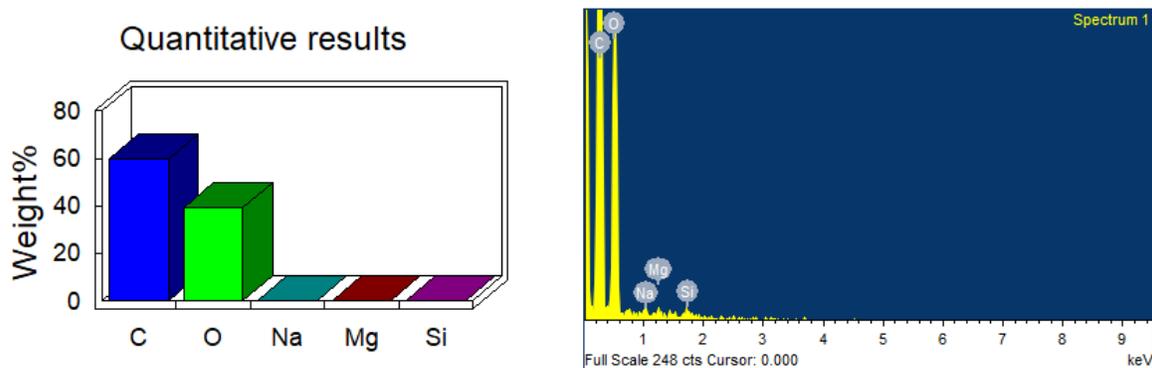


Figura 4.18. Análisis químico región 2. Elementos.



Tabla 4.4. Composición química de la región 2.

ELEMENTO	PESO(%)	ATÓMICO(%)
C	60,05	66,79
O	39,45	32,94
Na	0,17	0,10
Mg	0,14	0,08
Si	0,19	0,09

Al igual que en el anterior, en el espectro que ofrece el SEM de la región 3, se observan grandes cantidades de carbono y oxígeno y trazas de sodio, magnesio y silicio.

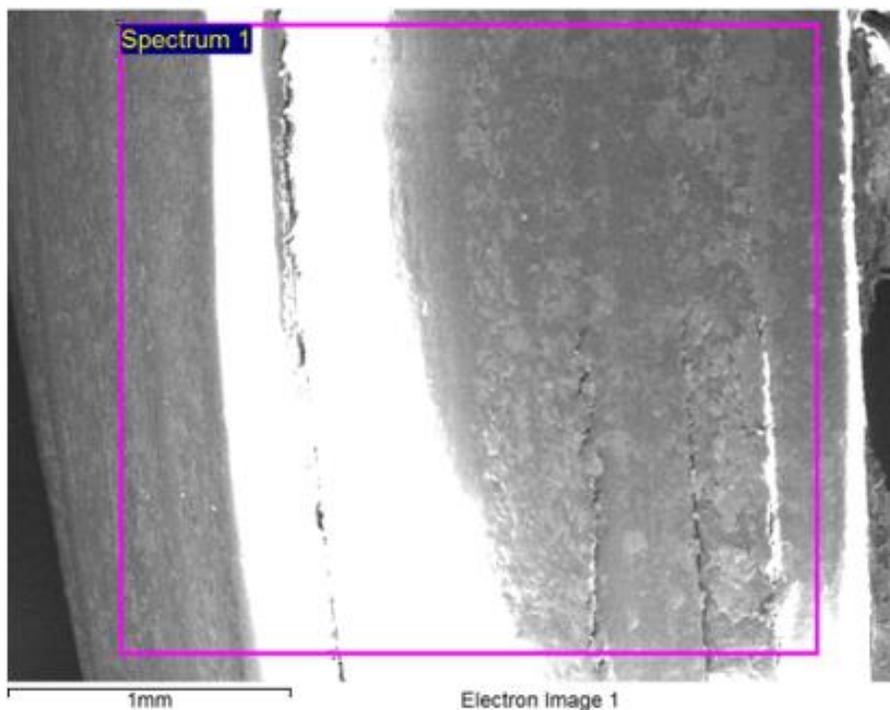


Figura 4.19. Región de análisis 3 (Muestra 2).



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

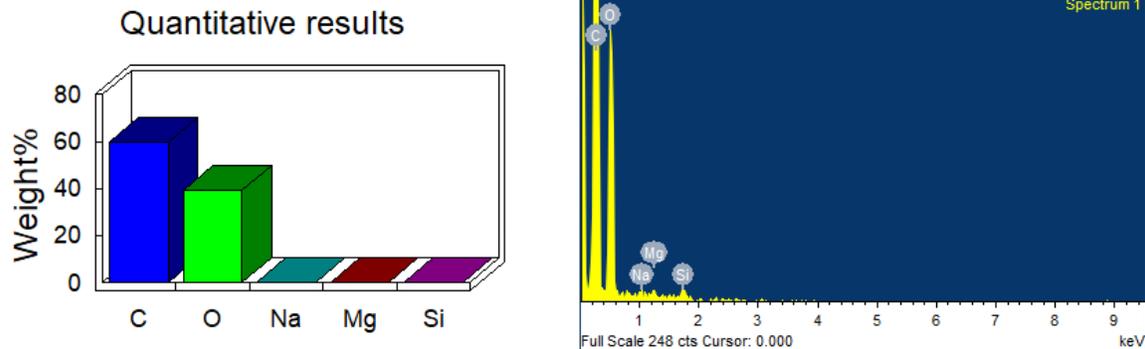


Figura 4.20. Análisis químico región 3. Elementos.

Tabla 4.5. Composición química de la región 3.

ELEMENTO	PESO(%)	ATÓMICO(%)
C	60,05	66,79
O	39,45	32,94
Na	0,17	0,10
Mg	0,14	0,08
Si	0,19	0,09

Obtenidos estos resultados, y viendo que contienen, aunque en pequeño porcentaje, algunos componentes con propiedades cementantes, el siguiente paso será incinerar los plumeros, para eliminar el contenido en carbono y analizar sus cenizas.

4.1.4 Composición química de la ceniza de plumero

De igual manera que se hizo anteriormente con las muestras de plumero, se observa la ceniza de estos en el microscopio electrónico de barrido (SEM), para comprobar su composición química una vez incinerados.

El espectro ofrecido por el SEM de la región de análisis 1, muestra un alto contenido en sílice (SiO₂), lo cual es algo positivo, ya que es un componente utilizado para hacer cemento. También se ven trazas de otros componentes como sodio, magnesio, azufre y calcio.

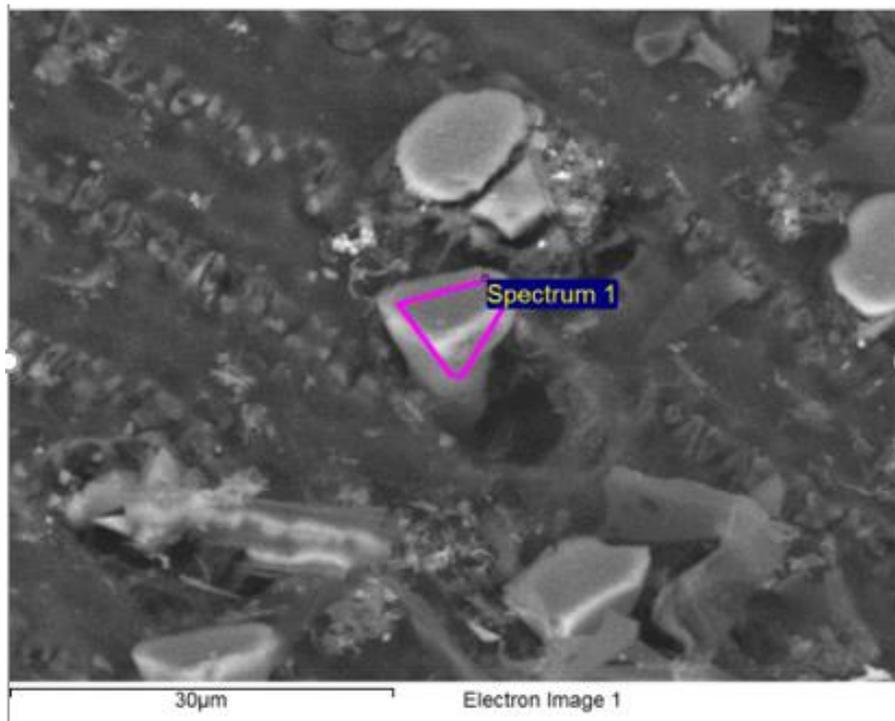


Figura 4.21. Región de análisis 1.

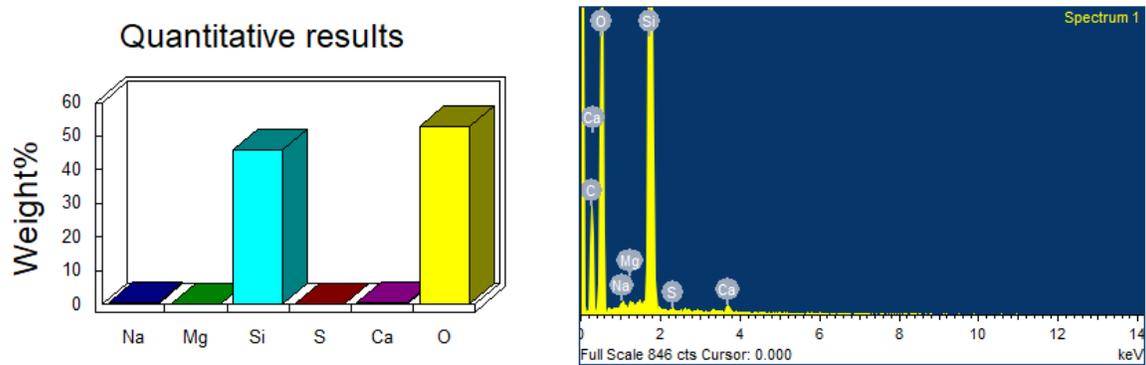


Figura 4.22. Análisis químico región 1. Elementos.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Tabla 4.6. Composición química de la región 1.

ELEMENTO	PESO(%)	ATÓMICO(%)	COMPUESTO(%)	FÓRMULA
Na	0,39	0,34	0,53	Na ₂ O
Mg	0,23	0,19	0,38	MgO
Si	45,72	32,69	97,81	SiO ₂
S	0,17	0,11	0,43	SO ₃
Ca	0,61	0,31	0,86	CaO
O	52,88	66,37		

En el espectro mostrado de la región de análisis 2, se ve un alto contenido en sílice (SiO₂) y en óxido de calcio o cal (CaO), la cual tiene usos como conglomerante en la construcción. En menor medida, también hay presencia de magnesio, sodio y azufre, expresados sus contenidos en forma de óxidos y trióxido respectivamente (MgO), (Na₂O), (SO₃), así como trazas de aluminio. Todos ellos son componentes habituales de los conglomerantes más comunes, como es el caso del clínker de Portland.

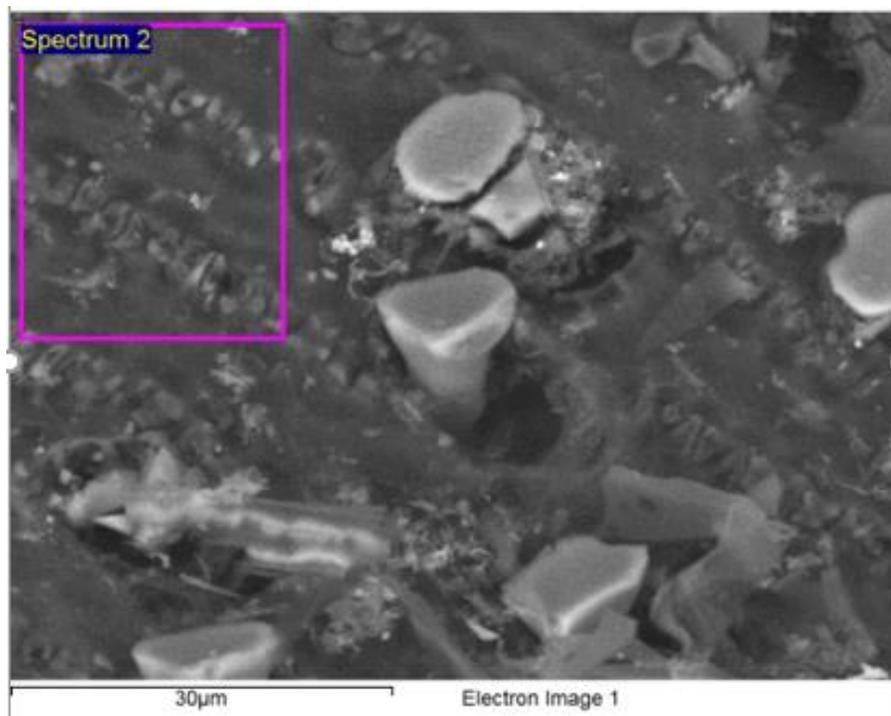


Figura 4.23. Región de análisis 2.

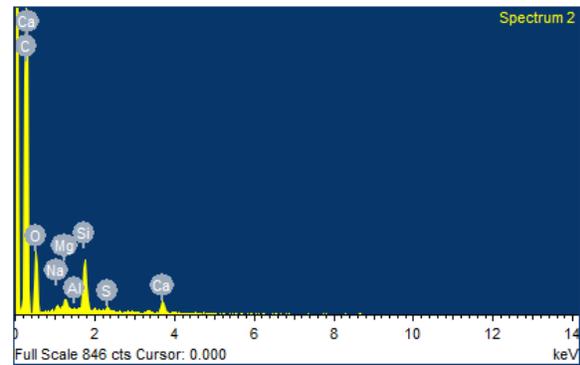
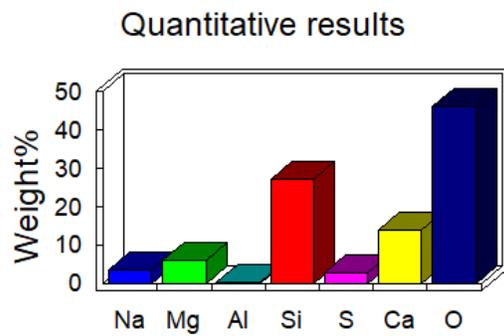


Figura 4.24. Análisis químico región 2. Elementos.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Tabla 4.7. Composición química de la región 2.

ELEMENTO	PESO(%)	ATÓMICO(%)	COMPUESTO(%)	FÓRMULA
Na	3,51	3,24	4,73	Na ₂ O
Mg	6,00	5,24	9,94	MgO
Al	0,32	0,25	0,60	Al ₂ O ₃
Si	27,15	20,54	58,08	SiO ₂
S	2,92	1,94	7,29	SO ₃
Ca	13,84	7,34	19,36	CaO
O	46,27	61,46		

Las tablas 10, 11 y 12 muestran el análisis químico de otras regiones de estudio.

Los espectros de estas regiones de estudio recogen una zona global de la ceniza. En todas ellas se puede comprobar que los compuestos que aparecen en mayor medida son la sílice y la cal, seguidos del magnesio, fósforo y potasio, expresados sus contenidos en forma de óxido de magnesio (MgO), anhídrido fosfórico (P₂O₅) y óxido de potasio (K₂O). Tanto el óxido de magnesio como el de potasio, se utilizan en la fabricación de algunos cementos. Si hubiera mucha presencia de MgO, el cemento podría llegar a ser expansivo. Por su parte el P₂O₅ ataca a los metales en presencia de agua, lo cual podría suponer un problema a la hora de utilizarlo en hormigones con algún tipo de armadura.

En menor medida, también aparecen sodio y azufre, siendo este último un importante contaminante y el principal componente de la lluvia ácida. También se encuentran trazas de hierro y aluminio.

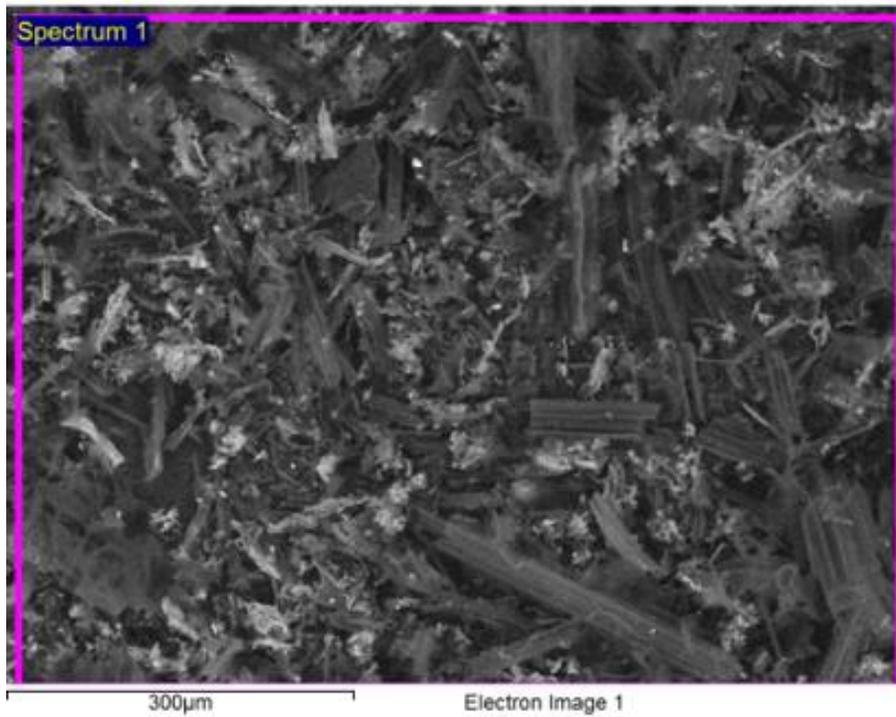


Figura 4.25. Región de análisis 3.

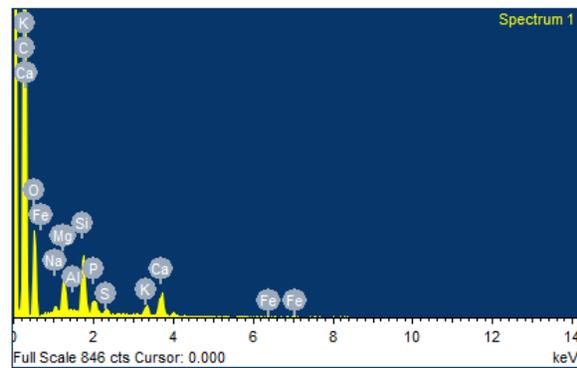
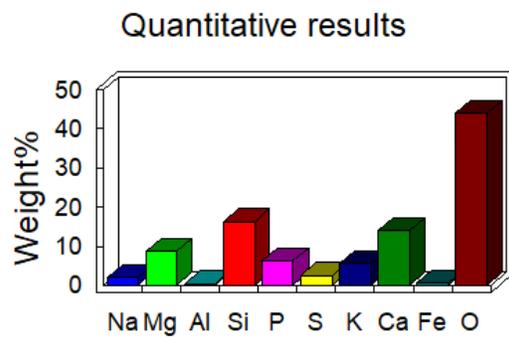


Figura 4.26. Análisis químico región 3. Elementos.



**ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS
CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN
DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO
POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**



Tabla 4.8. Composición química de la región 3.

ELEMENTO	PESO(%)	ATÓMICO(%)	COMPUESTO(%)	FÓRMULA
Na	2,07	1,97	2,79	Na ₂ O
Mg	8,64	7,80	14,33	MgO
Al	0,33	0,27	0,62	Al ₂ O ₃
Si	16,26	12,71	34,79	SiO ₂
P	6,17	4,37	14,14	P ₂ O ₅
S	2,48	1,70	6,19	SO ₃
K	5,60	3,15	6,75	K ₂ O
Ca	14,02	7,68	19,62	CaO
Fe	0,60	0,23	0,77	FeO
O	43,82	60,12		

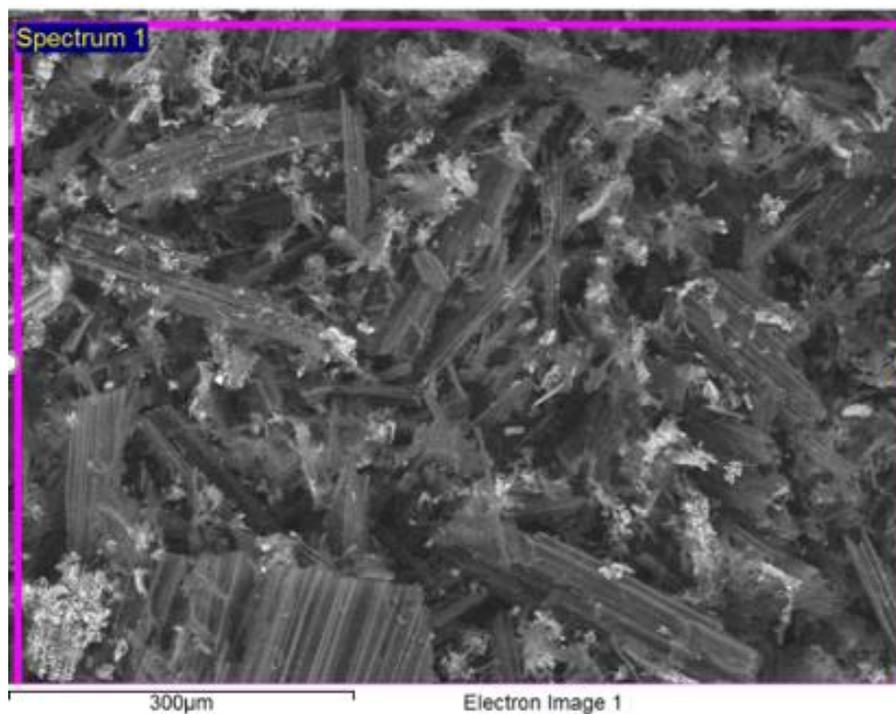


Figura 4.27. Región de análisis 4.

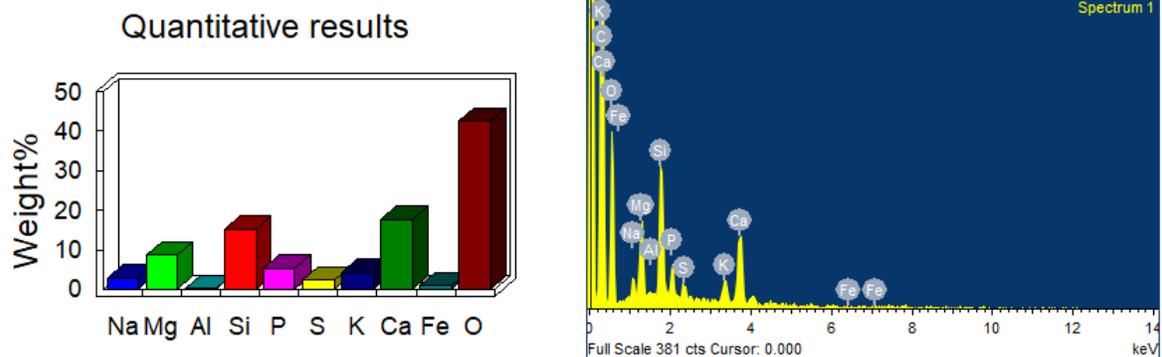


Figura 4.28. Análisis químico región 4. Elementos.



**ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS
CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN
DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO
POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**



Tabla 4.9. Composición química de la región 4.

ELEMENTO	PESO(%)	ATÓMICO(%)	COMPUESTO(%)	FÓRMULA
Na	2,88	2,78	3,88	Na ₂ O
Mg	8,56	7,82	14,19	MgO
Al	0,26	0,21	0,49	Al ₂ O ₃
Si	15,18	12,01	32,48	SiO ₂
P	5,23	3,75	11,98	P ₂ O ₅
S	2,34	1,62	5,85	SO ₃
K	4,34	2,46	5,23	K ₂ O
Ca	17,66	9,79	24,71	CaO
Fe	0,94	0,37	1,20	FeO
O	42,62	59,18		

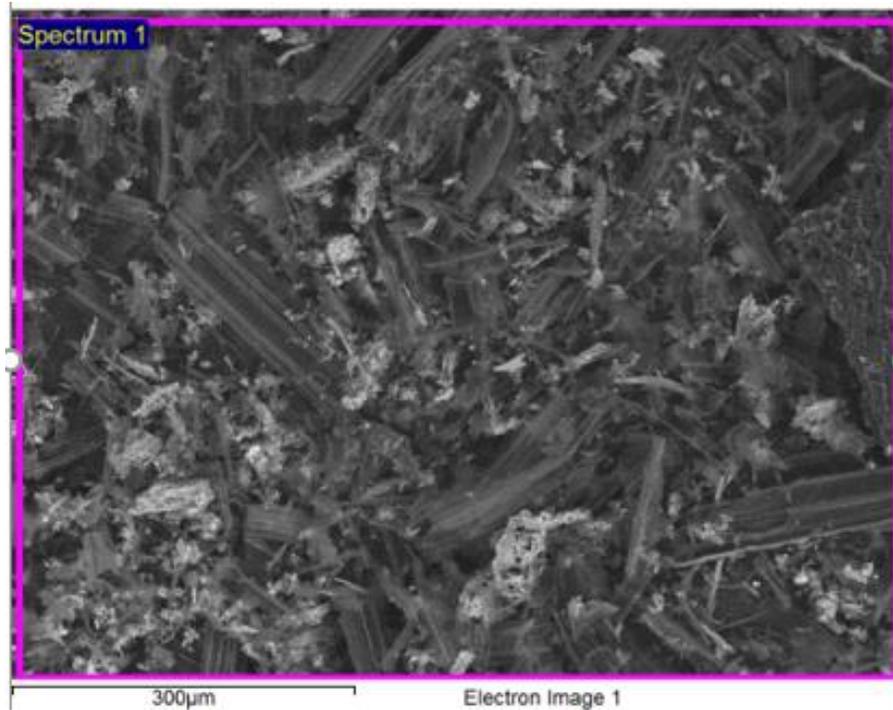


Figura 4.29. Región de análisis 5.

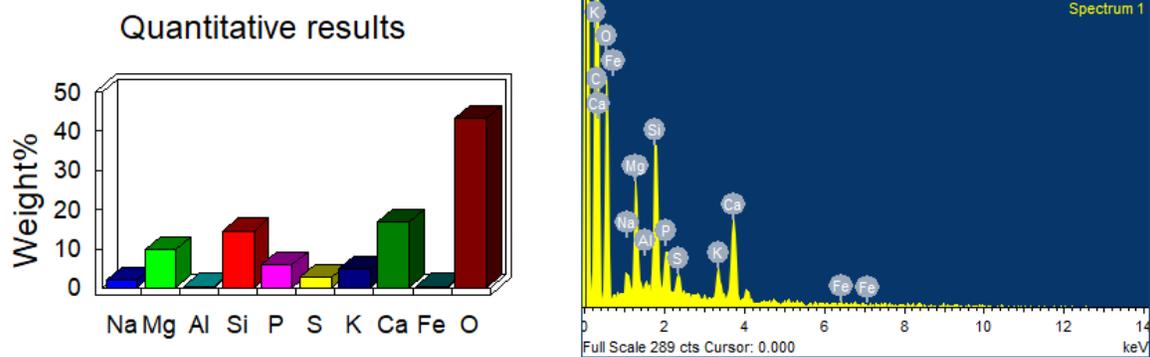


Figura 4.30. Análisis químico región 5. Elementos.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Tabla 4.10. Composición química de la región 5.

ELEMENTO	PESO(%)	ATÓMICO(%)	COMPUESTO(%)	FÓRMULA
Na	1,91	1,84	2,57	Na ₂ O
Mg	9,65	8,78	16,00	MgO
Al	0,43	0,35	0,81	Al ₂ O ₃
Si	14,45	11,37	30,92	SiO ₂
P	5,92	4,22	13,56	P ₂ O ₅
S	2,55	1,76	6,36	SO ₃
K	4,82	2,72	5,81	K ₂ O
Ca	16,74	9,23	23,42	CaO
Fe	0,43	0,17	0,55	FeO
O	43,11	59,56		

Con los resultados obtenidos, sobretodo la abundante presencia de cal y sílice, se cree que la ceniza podría funcionar como sustituto del cemento. Esta hipótesis se vería reforzada en caso de que la ceniza diera positivo en el ensayo de actividad puzolánica y tuviera marcado carácter amorfo, para lo cual se completa la caracterización con un ensayo de puzolanidad y una difracción de rayos X (XRD). Posteriormente, para valorar su aptitud resistente, se realizarán probetas de mortero con este material en diferentes porcentajes, analizando su comportamiento mecánico.

4.1.5 Puzolanidad de las cenizas

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la concentración en iones hidróxilo y la concentración de óxido de calcio, en milimoles/litro, obtenidos en el ensayo de puzolanidad realizado a las cenizas de los plumeros, para un tiempo de 8 y de 16 días de reposo.



Tabla 4.11. Resultados del ensayo de puzolanicidad de las cenizas.

	8 Días	16 días
[OH] ⁻ (mmoles/litro)	1,455	2,231
[CaO] (mmoles/litro)	4,446	7,469

Con los resultados obtenidos, se puede determinar que la muestra cumple el ensayo de puzolanicidad.

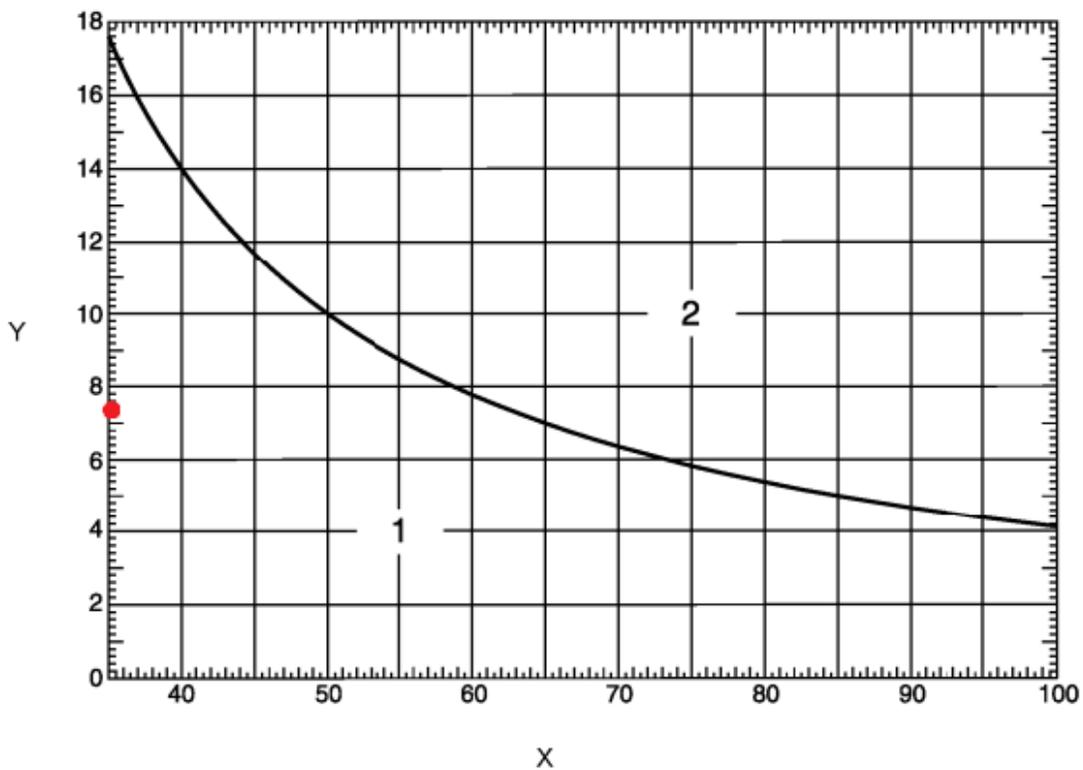


Figura 4.31. Representación gráfica de las concentraciones a 16 días de iones de [OH]⁻ y [CaO] sobre el diagrama de concentración de saturación. Fuente: Norma UNE EN 196-5.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Leyenda:

- 1: Pasa
- 2: No pasa
- X: Concentración de iones hidroxilo (mmol/l)
- Y: Concentración de iones calcio (mmol/l)

En efecto, como se aprecia en la Figura 4.31, las concentraciones a 16 días de iones hidróxilo y óxido de calcio representadas sobre la curva de concentración de saturación marcan un punto por debajo de dicha curva (Región 1), dentro de la zona que evidencia que la muestra presenta actividad puzolánica.

4.1.6 Difracción de Rayos X (XRD) de las cenizas de plumero

El difractograma mostrado a continuación, obtenido como resultado del análisis de difracción de Rayos X (XRD) de la ceniza, muestra que se trata de un sólido amorfo.

Los átomos ordenados de forma periódica, formando cristales, dispersan los rayos X en pocas direcciones, debido a que el orden periódico de estos, origina una interferencia destructiva de los rayos dispersados en todas las direcciones, salvo en aquellas que cumplen la Ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d \cdot \text{sen}(\theta)$$

En cambio, los sólidos amorfos, como es este caso, tienen estructuras en las que no hay periodicidad y solo se mantiene el orden de corto alcance. El resultado que se obtiene, por tanto, es una curva de dispersión de rayos X, con poca presencia de máximos de difracción.

En el difractograma de la Figura 4.32, se puede observar un máximo de difracción coincidente con la Sílice, compuesto mayoritario de la ceniza, como se puede comprobar en el apartado 4.1.4, con los resultados obtenidos en el SEM.

Los materiales amorfos, al contrario de los cristalinos, tienen la propiedad de ser reactivos, es decir, que al entrar en contacto con otro material, tienden a provocar una reacción química. Esta propiedad está relacionada con la puzolanicidad, que como se ha visto en el apartado 4.1.5, está presente en la ceniza. Esto permite que la sílice, reaccione con la cal, a una temperatura ambiente y en presencia de agua, formando compuestos hidráulicos semejantes a los originados en la hidratación de los componentes del clínker de Portland, convirtiendo al material en un sólido con propiedades conglomerantes. [5]

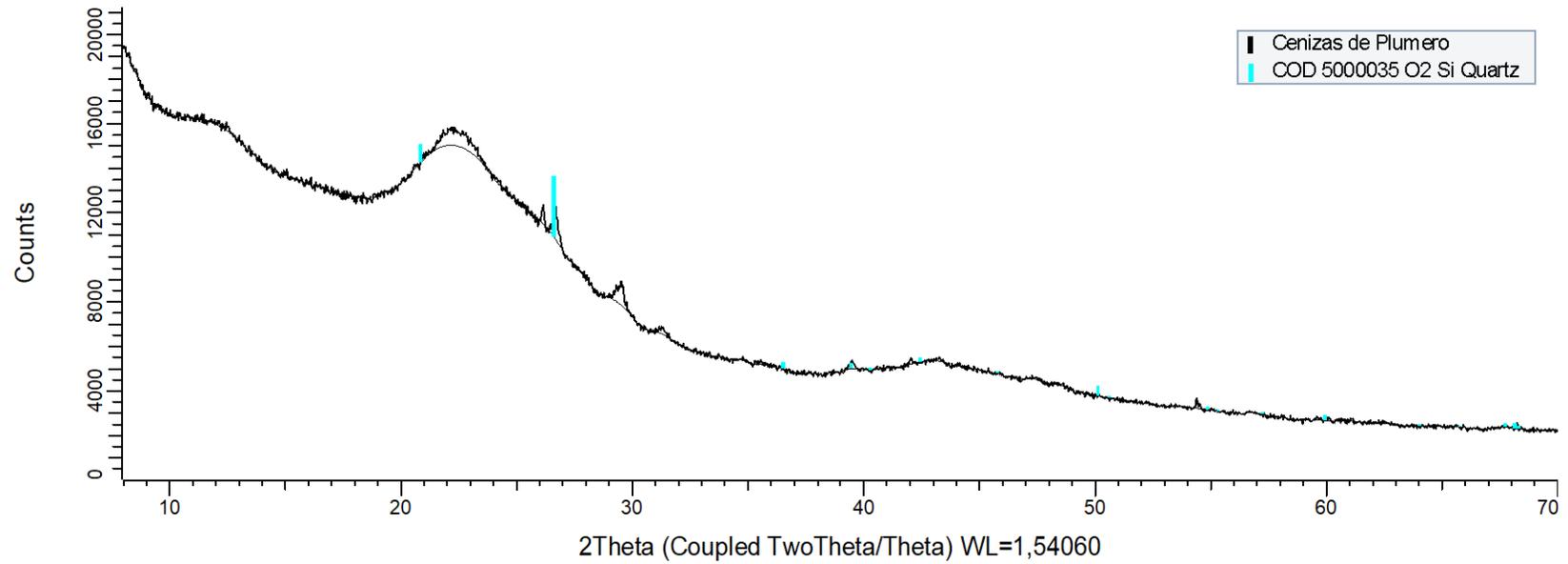


Figura 4.32. Diffractograma de la ceniza de plumero.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



4.2 PROPIEDADES DEL CEMENTO

La tabla 4.12 muestra los resultados de densidad y superficie específica de Blaine, obtenidos en la caracterización del cemento utilizado en la confección de los morteros.

Tabla 4.12. Propiedades físicas del cemento.

CEMENTO	DENSIDAD (g/cm ³)	SUPERFICIE ESPECÍFICA BLAINE (cm ² /g)
CEM I 52,5 R	3,213	3805

El tipo de cemento utilizado corresponde a un CEM I 52,5 R. Se trata de un cemento de tipo I de alta clase resistente, que deberá tener una resistencia a compresión mínima a 28 días de 52,5 MPa, siendo lo habitual 60 MPa. Los cementos de tipo I deben tener un contenido en clínker de Portland de entre el 95% y el 100%.

La densidad obtenida, ligeramente superior a 3 g/cm³, concuerda con la densidad teórica de este tipo de cementos.

La superficie específica de Blaine obtenida, es del orden de magnitud, aunque ligeramente inferior, a otros cementos de este tipo, a los que se ha tenido acceso. La normativa española no establece un valor estándar para la finura del cemento, pero hay un valor mínimo establecido por la ASTM (American Society for Testing and Materials), de 2800 cm²/g para los cementos del tipo I, que en este caso se supera ampliamente. [12]

4.3 PROPIEDADES DE LA ARENA

La tabla 4.13 muestra el resultado de la densidad de la arena utilizada en la fabricación de los morteros.

Tabla 4.13. Propiedades de la arena.

ARENA	DENSIDAD (g/cm ³)
ARENA SILICEA	2,629



4.4 DOSIFICACIÓN DEL MORTERO

Las cantidades que establece la norma para la realización de mortero son 450 g de cemento, 1350 g de arena y 225 g de agua.

Como se explica en el apartado 3.4, la relación ceniza/cemento, se realiza en volumen, para lo cual se dividen los pesos de cada componente por sus densidades, calculadas previamente, quedando los siguientes resultados.

Tabla 4.14. Volumen de los componentes para los diferentes tipos de mortero, según la norma.

	MORTERO DE CONTROL	MORTERO I	MORTERO II	MORTERO III
CEMENTO (cm ³)	140,056	105,042	70,028	35,014
ARENA (cm ³)	513,503	513,503	513,503	513,503
AGUA (cm ³)	225	225	225	225
CENIZA (cm ³)	0	35,0140	70,028	105,042
TOTAL (cm ³)	878,559			

Con estos resultados, se calcula el porcentaje de ceniza total que se lleva cada tipo de mortero, dividiendo el volumen de cada uno de ellos entre el volumen total de cenizas, quedando los siguientes resultados:

Tabla 4.15. Porcentaje de ceniza para cada tipo de mortero.

TIPO DE MORTERO	PORCENTAJE DE CENIZA (%)
MORTERO I	16,667
MORTERO II	33,333
MORTERO III	50



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Para calcular el volumen de ceniza que se tiene, se divide la masa (14 gramos) entre su densidad, para la cual se ha estimado un valor de $0,5 \text{ g/cm}^3$, obteniendo un valor de 28 cm^3 .

A partir de este valor, se calcula el volumen de ceniza que contendrá cada mortero, aplicando el porcentaje de cada uno de estos al volumen total estimado.

Tabla 4.16. Volumen de ceniza para cada tipo de mortero.

TIPO DE MORTERO	VOLUMEN DE CENIZA (cm^3)
MORTERO I	4,667
MORTERO II	9,333
MORTERO III	14

Relacionando estos valores con los establecidos por la norma, se obtiene el volumen total de cada amasada para la cantidad de ceniza que se tiene, obteniendo un valor de $117,094 \text{ cm}^3$ por amasada.

Conociendo este valor, se puede obtener el volumen de cada componente de los diferentes tipos de mortero, a partir de los valores de la tabla 4.17, correspondientes a los valores teóricos basados en la norma.

Tabla 4.17. Volumen de los componentes para los diferentes tipos de mortero.

	MORTERO DE CONTROL	MORTERO I	MORTERO II	MORTERO III
CEMENTO (cm^3)	18,667	14	9,333	4,667
ARENA (cm^3)	68,439	68,439	68,439	68,439
AGUA (cm^3)	29,988	29,988	29,988	29,988
CENIZA (cm^3)	0	4,667	9,333	14



Para realizar las amasadas, se necesitan los valores de cada componente en masa, para que sea más cómodo a la hora de medir las cantidades. Para ello, se vuelven a multiplicar los volúmenes de cada componente por sus correspondientes densidades, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 4.18. Masa de los componentes para los diferentes tipos de mortero.

	MORTERO DE CONTROL	MORTERO I	MORTERO II	MORTERO III
CEMENTO (g)	59,976	44,982	29,988	14,994
ARENA (g)	179,928	179,928	179,928	179,928
AGUA (g)	29,988	22,491	14,994	7,497
CENIZA (g)	0	2,333	4,667	7

La cantidad de agua (W) cambia en cada mortero, ya que esta es función de la cantidad de cemento (C), con una relación $\frac{W}{C} = 0,5$.

4.4.1 Número de probetas

Para estimar el número aproximado de probetas que saldrán, con la cantidad de mortero que se tiene, se divide el volumen total de una amasada ($117,094 \text{ cm}^3$) entre el volumen de cada probeta.

Las probetas utilizadas, son probetas cilíndricas de 2 cm de diámetro por 4 cm de altura, por lo que su volumen es alrededor de 13 cm^3 . Se toma para los cálculos del número de probetas un volumen de $15 \text{ cm}^3/\text{probeta}$.

Con este cálculo, se obtiene un total de 7 probetas por amasada. A la hora de construir las probetas, han salido 6 probetas por amasada. Esta diferencia puede deberse a la estimación de la densidad de la ceniza y a pérdidas de material durante el proceso de amasado.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



4.5 RESISTENCIA A COMPRESIÓN UNIAXIAL

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a compresión uniaxial para los diferentes tipos de mortero a los 28 días de edad. Se ha tomado para cada tipo de mortero, la mejor de las tres probetas ensayadas.

Tabla 4.19. Resistencia a compresión uniaxial a los 28 días de edad.

MORTERO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)
CONTROL	32,6
TIPO I	3,3
TIPO II	4,3
TIPO III	1,3

Como se puede comprobar, la resistencia a compresión uniaxial del mortero de control, es muy superior a la de los morteros con presencia de cenizas, siendo unas 8 veces superior al mejor de ellos.

En la siguiente gráfica se establece una comparación entre las curvas de tensión-deformación de los diferentes tipos de mortero, donde se aprecia la diferencia entre el mortero de control y los morteros con sustitución de ceniza.

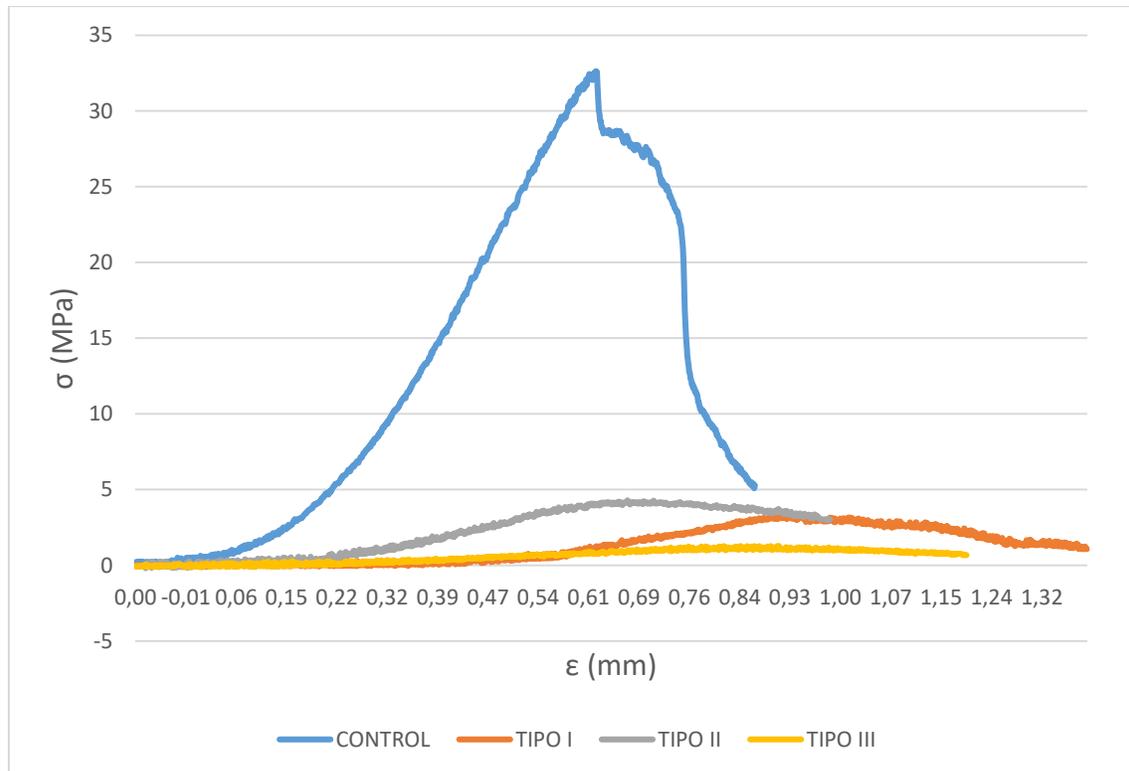


Figura 4.33. Curvas tensión-deformación de los cuatro tipos de mortero.

De los morteros con contenido de ceniza, el que mejor resistencia a compresión presenta es el mortero TIPO II, con 50% de sustitución de ceniza, alcanzando los 4,3 MPa, frente a los 3,3 MPa que alcanza el mortero TIPO I y los 1,3 MPa del TIPO III.

El motivo de que el mortero TIPO II tenga mejor resistencia a compresión que el TIPO I, puede deberse a que el 50% de ceniza se acerque más que el 25% a la mezcla óptima para que la reacción puzolánica de la ceniza tenga su mayor efecto, provocando una mejora en la resistencia.

En la siguiente gráfica se representan las curvas tensión-deformación de los tres tipos de mortero con presencia de ceniza, donde se puede apreciar la diferencia entre ellos.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

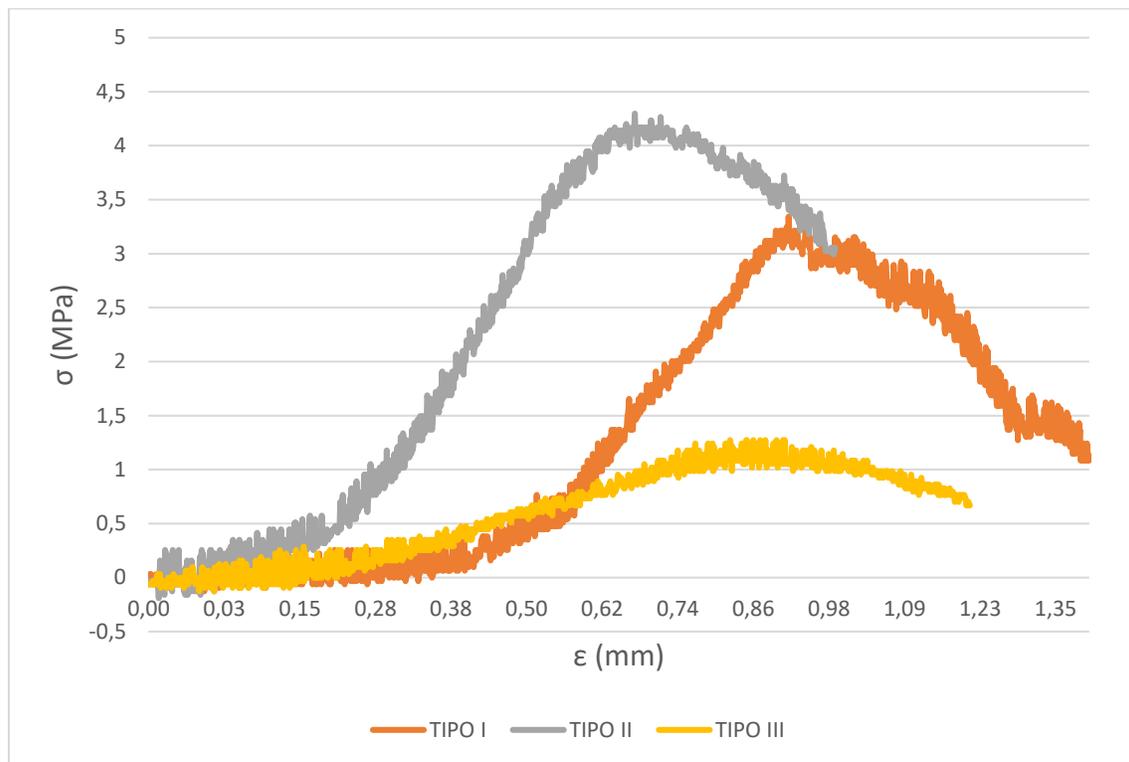


Figura 4.34. Curvas tensión-deformación de los morteros con ceniza.

Obtenidos estos resultados, junto con los de propiedades físicas, calculados a continuación, se podrá valorar si este tipo de mortero con sustitución de cemento por ceniza, es válido para algún tipo de construcción.

4.6 MICROESTRUCTURA DE LAS PROBETAS

En las imágenes aportadas por el SEM, se puede observar que la estructura de las probetas está bastante bien cohesionada, lo cual es positivo desde el punto de vista de la resistencia mecánica a compresión, aunque previsiblemente su porosidad será elevada a la vista de la microestructura que presenta.

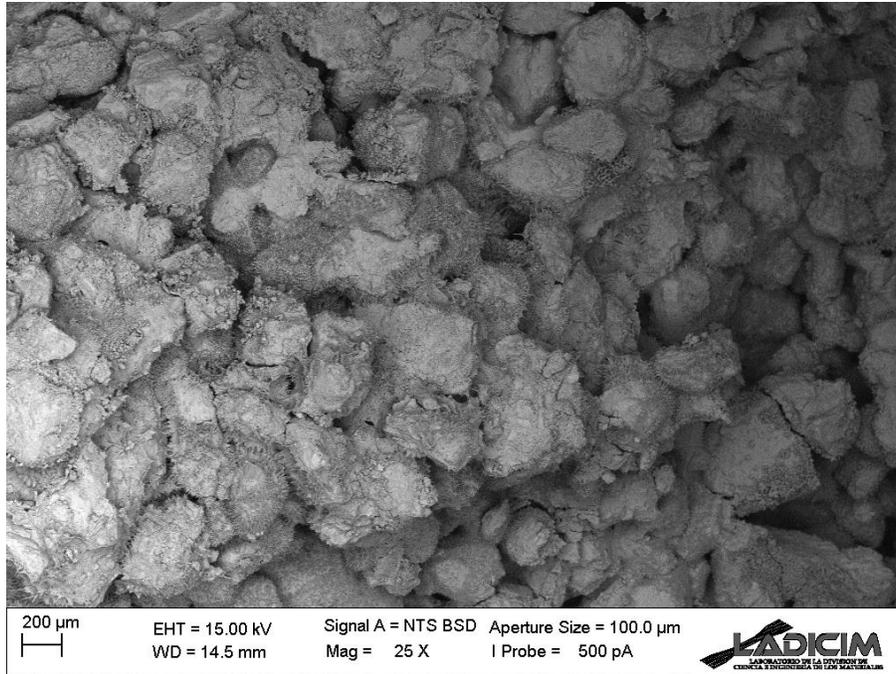


Figura 4.35. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.

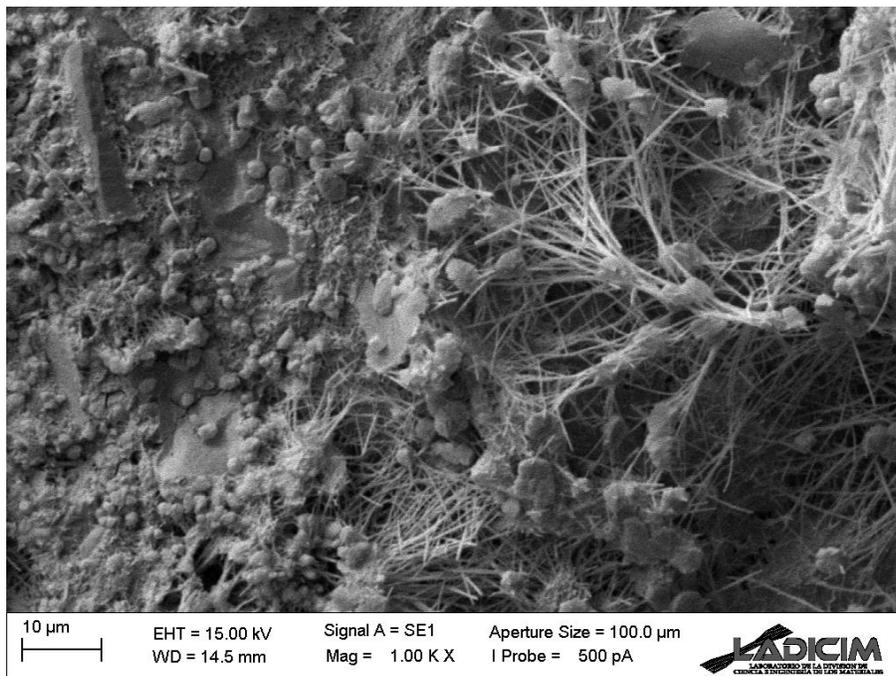


Figura 4.36. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

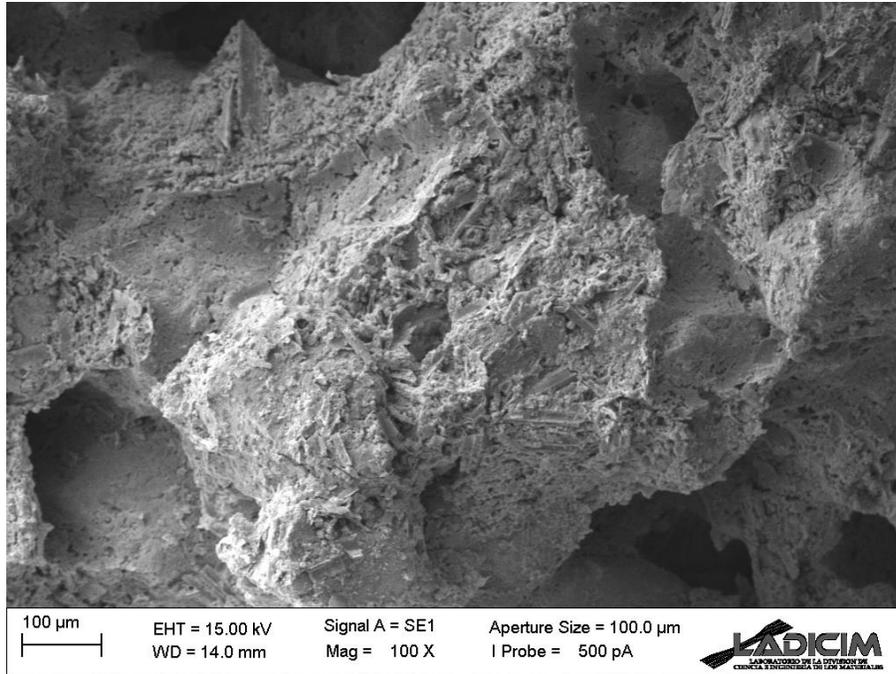


Figura 4.37. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.

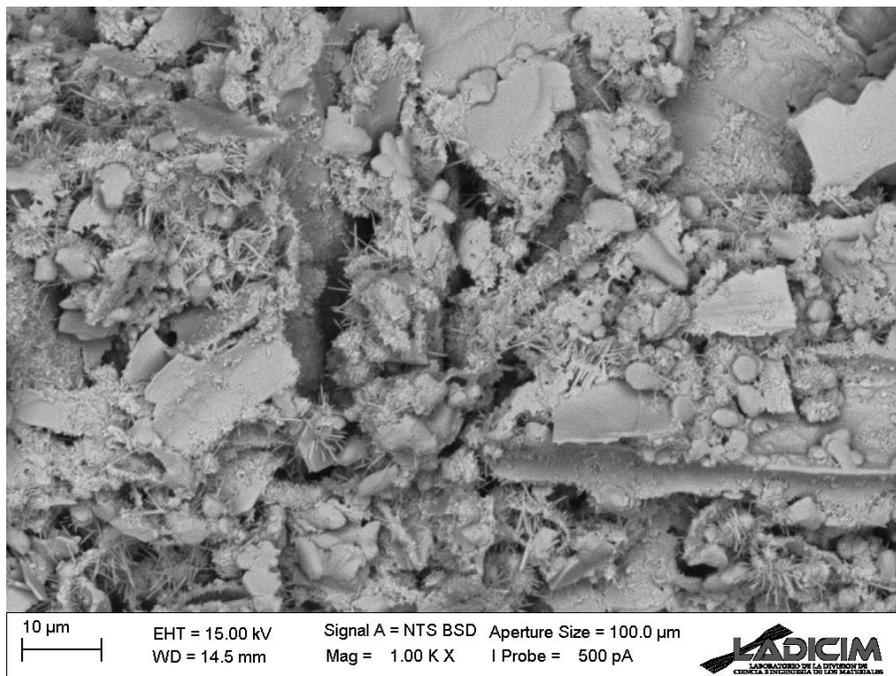


Figura 4.38. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.

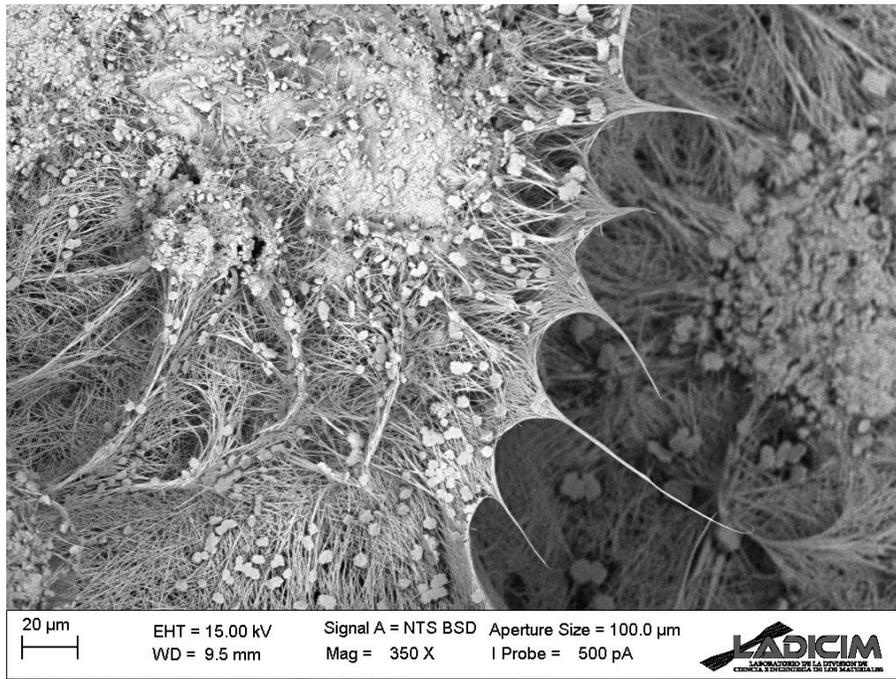


Figura 4.39. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.

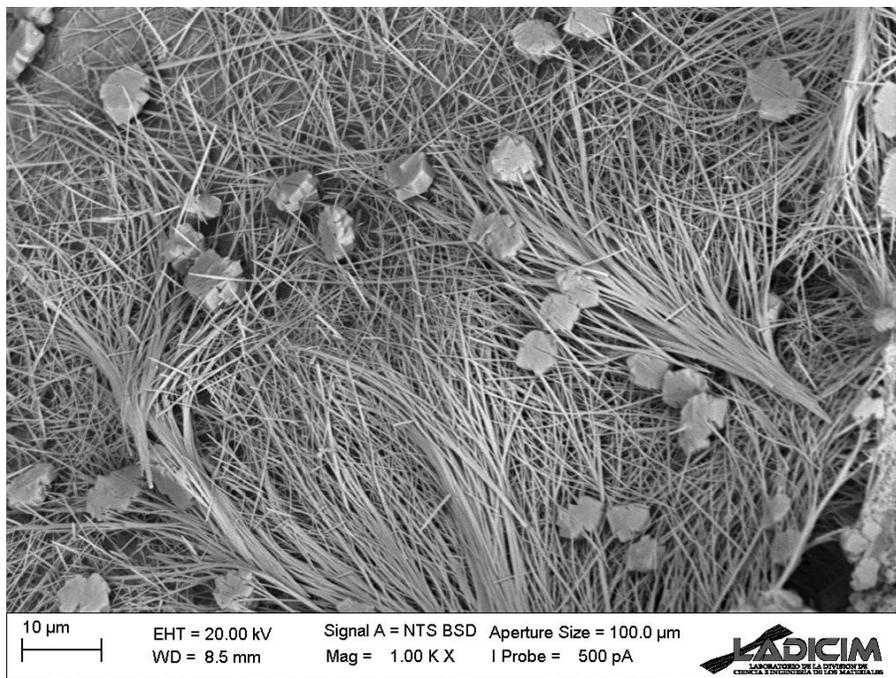


Figura 4.40. Detalle de la microestructura de probeta de mortero con presencia de ceniza.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



4.7 PROPIEDADES FÍSICAS

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para las propiedades físicas de los morteros.

Tabla 4.20. Propiedades físicas de los morteros.

MORTERO	MUESTRA	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	DENSIDAD RELATIVA (g/cm ³)	DENSIDAD SATURADA (g/cm ³)	POROSIDAD (%)	ABSORCIÓN (%)
CONTROL	0-2	1,96	2,43	2,15	19,27	9,83
	0-3	1,97	2,45	2,17	19,67	9,98
	0-4	1,95	2,41	2,14	18,96	9,71
TIPO I	25-2	1,68	2,25	1,93	25,45	15,19
	25-4	1,68	2,24	1,93	24,79	14,75
TIPO II	50-2	1,70	2,31	1,97	26,52	15,59
	50-3	1,70	2,33	1,97	27,23	16,03
TIPO III	75-4	1,46	2,36	1,84	38,06	26,04

Las muestras son identificadas por dos números separados por un guion. El primero hace referencia al porcentaje de ceniza de la muestra y el segundo al número de microprobeta que corresponde.

La densidad del mortero depende principalmente de las densidades de sus componentes (cemento, arenas y en este caso cenizas), su granulometría y el volumen que ocupen en la dosificación. También influye la relación agua/cemento, siendo más poroso y por tanto menos denso, cuanto más aumenta esta.

En el presente estudio, al hacer una sustitución de cemento por ceniza, con una densidad unas seis veces menor, se observa en los resultados como las densidades de los morteros con presencia de ceniza, son notablemente menores que las del mortero de control.



Según la norma UNE-EN-998-2, se considera ligero un mortero con una densidad aparente igual o menor a $1,3 \text{ g/cm}^3$. En este caso, el mortero con menor densidad aparente, motero TIPO III, tiene una densidad ligeramente superior a $1,3 \text{ g/cm}^3$.

La porosidad condiciona la densidad, absorción, permeabilidad y resistencia del mortero. Además, tiene influencia directa en la durabilidad de los morteros, ya que su estructura porosa permite el acceso y circulación del agua y del aire, así como de los agentes agresivos contenidos en ellos.

En los resultados obtenidos, se puede observar como la porosidad aumenta, conforme aumenta el porcentaje de sustitución de ceniza. Un mortero con una porosidad superior al 25%, puede considerarse un mortero poroso, de baja calidad. En el caso del mortero de tipo I está rondando ese valor, el de tipo II lo supera ligeramente, y el de tipo III lo supera ampliamente, llegando a valores de 38% de porosidad.

La absorción de un mortero, determina su permeabilidad. Un mortero permeable, permitirá el paso del agua a su interior, originando humedades por filtración, además del tránsito de partículas perjudiciales para su durabilidad. La absorción está relacionada con la estructura capilar del mortero, por lo que, cuanto más compacto sea, menor será la red capilar y por tanto su absorción.

Los datos obtenidos, como era de esperar, están en consonancia con los datos de porosidad, aumentando el porcentaje de absorción, a medida que aumenta el contenido de ceniza.



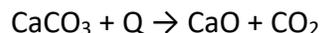
ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



5 BENEFICIO MEDIOAMBIENTAL

La sustitución de cemento por ceniza en la fabricación de morteros y hormigones tiene beneficios medioambientales, debido a que, en el proceso de fabricación del cemento, se produce un gran volumen de emisiones. La producción de clínker, componente principal del cemento Portland, es junto a la generación de electricidad y el refinado del petróleo, uno de los principales sectores industriales en emisiones de gases de efecto invernadero. El 5% de las emisiones de CO₂ mundiales, se deben a la fabricación del cemento. Para estimar de una manera sencilla la aportación de la fabricación del cemento a las emisiones de CO₂, se puede considerar que, por cada tonelada de cemento producido por las técnicas habituales, se emite una tonelada de CO₂.

El cemento se obtiene a partir de la molienda del clínker, junto con yeso y otros elementos. La producción del clínker viene de la calcinación, a unos 900 °C, de la piedra caliza, compuesta principalmente por carbonato cálcico (CaCO₃), para generar cal (CaO). En este proceso se libera dióxido de carbono CO₂, de acuerdo con la siguiente reacción:



Posteriormente la cal reacciona en el horno con otros compuestos como sílice, alúmina y óxidos de hierro, a una temperatura comprendida entre los 1400 °C y 1500 °C, para formar los principales constituyentes del clínker. Para calentar el horno se utilizan diferentes combustibles, generando emisiones propias de la combustión. El proceso de calcinación emite el 62% de los gases de efecto invernadero, mientras que la quema de combustibles emite el 38% restante.

Durante la fabricación del cemento ocurren, además, otras actividades emisoras de partículas, como la manipulación de materias primas, la molienda del clínker y los procesos de envasado y almacenaje. También, durante la obtención de materias primas que alimentan el proceso, fundamentalmente la extracción en canteras de la piedra caliza, la arcilla y el yeso utilizado como regulador de fraguado, se producen emisiones de partículas.

En la siguiente figura se pueden apreciar todas las emisiones producidas durante el proceso.

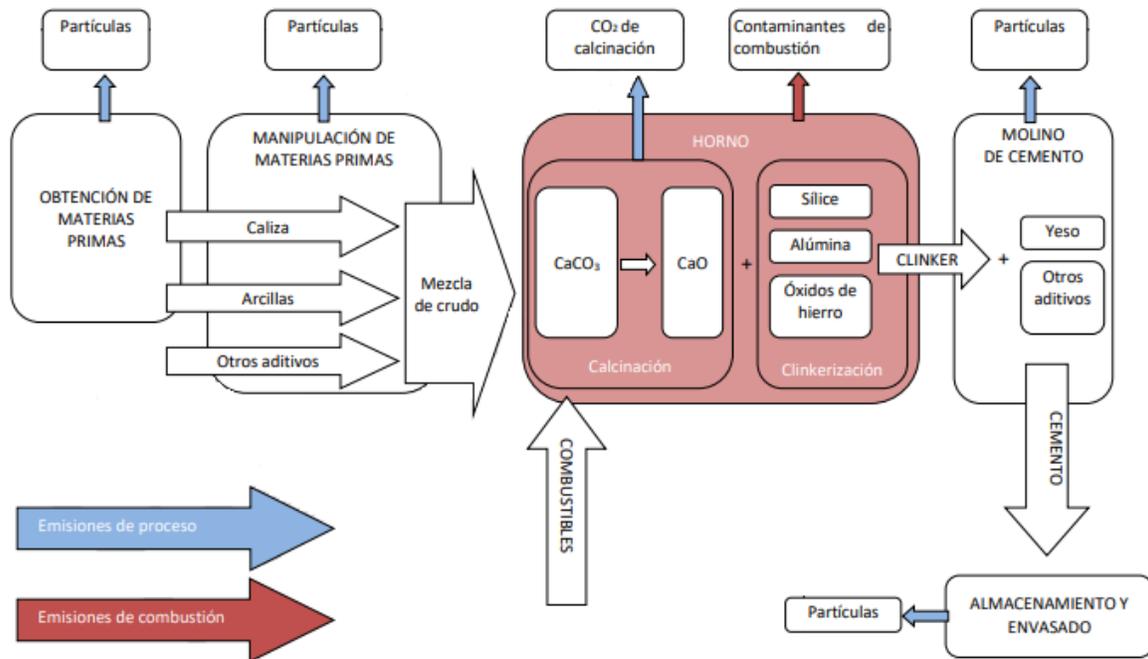


Figura 5.1. Esquema de las emisiones producidas en la fabricación del cemento. Fuente: Miteco

En la siguiente tabla se muestran los datos de emisiones de los principales contaminantes en la producción de clinker, para el año 2015, según el Sistema Español de Inventario de Emisiones.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA CORTADERIA SELLOANA COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Tabla 5.1. Datos de emisiones de los principales contaminantes en la producción de clínker.

CONTAMINANTE	CANTIDAD (Toneladas)
CO ₂	5.407.700
CH ₄	602,18
N ₂ O	90,76
NO _x	32.715
Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano	247
SO ₂	3.034

Evidentemente, la incineración de los plumeros para obtener sus cenizas también supondrá la emisión de cantidades significativas de CO₂ a la atmósfera.

Para hacer una comparación con las emisiones de CO₂ producidas en la obtención de cenizas a partir de la Cortaderia, se deberán considerar solamente las emisiones propias de la incineración de la planta y no las procedentes de la quema de combustibles en los hornos utilizados, ya que estas serán equivalentes a las producidas por los combustibles en la fabricación del cemento.

No obstante, no se dispone actualmente de datos específicos sobre las emisiones de gases asociadas a la incineración de los plumeros, pero en cualquier caso, dado que se trata del aprovechamiento y valorización de un residuo procedente de la erradicación de esta planta invasora, parece que el beneficio medioambiental con respecto a la utilización de cemento es claro, toda vez que en este caso no es necesario extraer la materia prima a partir de una cantera, con el impacto ecológico que ello supone. [3] [14]



6 CONCLUSIONES

En este apartado se relatan las conclusiones a las que se han llegado tras el análisis de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados y su comparación con datos oficiales de clasificación de morteros.

Se pueden clasificar los morteros en los siguientes tipos, según la normativa europea:

- Mortero de albañilería.
- Mortero de revoco/enlucido. Monocapas.
- Adhesivos cementosos. (Morteros cola).
- Morteros autonivelantes.

Según la norma UNE-EN 998-2, los morteros de albañilería son clasificados en varios tipos, todos ellos con una resistencia a compresión superior a los 25 MPa, lo cual supera ampliamente la resistencia de los morteros con presencia de ceniza estudiados.

Los morteros de revoco o enlucido, según su resistencia a compresión a 28 días, se clasifican en diferentes niveles, mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 6.1. Clasificación de los morteros de revoco/enlucido según su resistencia a compresión a 28 días.

CATEGORIA	VALORES
CS I	0,4 a 2,5 MPa
CS II	1,5 a 5,0 MPa
CS III	3,5 a 7,5 MPa
CS IV	≥ 6 MPa

Los morteros utilizados en el presente estudio se podrían clasificar de la siguiente manera:

- Mortero TIPO I, con 3,3 MPa, en la categoría CS II.
- Mortero TIPO II, con 4,3 MPa, en la categoría CS III.
- Mortero TIPO III, con 1,3 MPa, en la categoría CS I.



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA *CORTADERIA SELLOANA* COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



Esto permitiría utilizar los morteros TIPO I y TIPO II en enlucidos interiores a base de cemento sin requerimientos permeables y el TIPO II en revestimientos exteriores a base de cemento sin requerimientos permeables para enfoscados pintados u otros recubrimientos protectores con resistencias entre 3,5 y 7,5 MPa.

La norma UNE-EN 12004:2008, relativa a adhesivos, los clasifica de la siguiente manera:

- Adhesivo cementoso (C).
- Adhesivo en dispersión (D).
- Adhesivo de resinas reactivas (R).

Para cada uno de estos tipos existen diferentes clases, dependiendo de sus características. Las clases son las siguientes:

- Adhesivo normal (1)
- Adhesivo mejorado (2)
- Adhesivo de fraguado rápido (F)
- Adhesivo con deslizamiento reducido (T)
- Adhesivo con tiempo abierto ampliado (E)
- Adhesivo deformable (S1)
- Adhesivo altamente deformable (S2)

En la siguiente tabla, se pueden ver las distintas aplicaciones de los adhesivos cementosos, en función de sus características:



Tabla 6.2. Aplicaciones de los adhesivos cementosos según sus características.

		SOPORTE	ABSORCION(%)			
			E<=0,5	0,5<E<=3	3<E<=10	E>10
INTERIOR	ALICATADOS	Ladrillo/Bloque	C1	C1	C1	C1
		Mortero	C1	C1	C1	C1
		Cerámica gran formato	C1	C1	C1	C1
		Hormigón	C1	C1	C1	C1
		Yeso	C1 / D1	C1 / D1	C1 / D1	C1
		Cartón-Yeso	C1 S1 / D1	C1 S1 / D1	C1 S1 / D1	C1 S1 / D1
		Cartón-Yeso Hidrófugo	C2 S1 / D1	C2 S1 / D1	C2 S1 / D1	C2 S1 / D1
	Cerámica	R / D1	R / D1	R / D1	R / D1	
	SOLADOS	Mortero	C1	C1	C1	-
		Hormigón	C2	C1	C1	-
Cerámica/ Terrazo/ Marmol		R / C2	R / C2	R / C2	-	
EXTERIOR	ALICATADOS	Mortero	C2	C2	C2	-
		Hormigón	C2	C2	C2	-
	SOLADOS	Mortero	C2	C1	C1	-
		Hormigón	C2	C2	C2	-
		Ceramica/ Terrazo	R / C2	R / C2	R / C2	-

Todos los morteros con presencia de ceniza estudiados, superan ampliamente el 10% de absorción, por lo que únicamente serán válidos para alicatados de interior.

La normativa correspondiente a los morteros autonivelantes, Norma Europea prEN 13892-2, los clasifica de la siguiente manera, según su resistencia a compresión:

Tabla 6.3. Clasificación de los morteros autonivelantes según sus resistencias a compresión.

CLASE	C5	C7	C12	C16	C20	C25	C30	C35	C40	C50	C60	C70	C80
RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	5	7	12	16	20	25	30	35	40	50	60	70	80

El mejor de los morteros con presencia de ceniza (TIPO II) presente en este estudio no supera los 5 MPa, por lo que ninguno de ellos podrá ser utilizado como mortero autonivelante.

Indudablemente, la calcinación de plumeros a mayores temperaturas permitirá obtener cenizas con menores contenidos de carbono y, previsiblemente, con propiedades cementantes mejoradas, por lo que sería recomendable profundizar en estos aspectos en



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA *CORTADERIA SELLOANA* COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



futuros trabajos de investigación. Asimismo, sería de interés poder disponer de mayores volúmenes de cenizas que permitieran valorar su introducción en la confección de hormigones.

Por último, indicar que la legislación de la Comunidad Autónoma de Cantabria impide la obtención de beneficios económicos a través de la explotación y/o comercialización de especies invasoras o productos derivados de ellas, por lo que pese a los posibles beneficios industriales y medioambientales que supondría la introducción de las cenizas de plumero en la confección de morteros, en ningún caso sería posible la obtención de rendimientos económicos a partir de su uso. [13]



7 BIBLIOGRAFÍA

- [1](2018). *ESTRATEGIA DE GESTIÓN, CONTROL Y POSIBLE ERRADICACIÓN DEL PLUMERO DE LA PAMPA (cortaderia selloana) Y OTRAS ESPECIES DE CORTADERIA*. Gobierno de España, Ministerio para la transición ecológica. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/publicaciones/estretegia_cortaderia_tcm30-478427.pdf
- [2] Herrera Gallastegui, M., Campos Prieto, J. A., & María Pizarro, J. (2006). *EL CARRIZO DE LA PAMPA (Cortaderia selloana) EN BIZKAIA. GUÍA PRÁCTICA PARA SU CONTROL*. Universidad del País Vaco, Biología Vegetal y Ecología. Obtenido de <http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/r49-u95/es/u95aWar/u95aPintaFicheroServlet?idiomaFichero=es&codigoFichero=4123&tipoFichero=2&R01HNoPortal=true>
- [3] <http://www.domoterra.es>. (2013). Recuperado el 20 de Agosto de 2019, de <http://www.domoterra.es/blog/2013/04/02/el-cemento-y-la-produccion-de-co2/>
- [4] <http://www.scai.uma.es/>. (s.f.). Recuperado el 30 de Julio de 2019, de <http://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>
- [5] <https://serc.carleton.edu/index.html>. (s.f.). Recuperado el 2 de Agosto de 2019, de https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html
- [6] <https://www.guialab.com.ar/>. (2018). Recuperado el 3 de Agosto de 2019, de <https://www.guialab.com.ar/notas-tecnicas/calorimetria-diferencial-de-barrido-dsc>
- [7] (s.f.). *METODO Cortaderia selloana: Programa de control de plantas invasoras en Cantabria*. Gobierno de Cantabria, Consejería de ganadería, pesca y desarrollo rural, Santander.
- [8] (s.f.). *Norma UNE EN 196-5*.
- [9] Sosa Yépez, I. (2017). *Incorporación de escorias siderúrgicas en hormigones autocompactantes de altas prestaciones*. Universidad de Cantabria.
- [10] Tamayo Castañeda, P. (2017). *Diseño y caracterización de un hormigón de alta densidad para protección radiológica utilizando magnetita*. Universidad de Cantabria.
- [11] Valderrivas, G. c. (s.f.). www.valderrivas.es. Recuperado el 30 de Julio de 2019, de http://www.valderrivas.es/recursos/doc/Productos/Cemento/Productos/Olazagutia/2072244457_1912011133019.pdf
- [12] Matallana Rodríguez, R. (2005). *Cemento portland*. Instituto Colombiano de Productores de Cemento. Recuperado el 4 de agosto de 2019



ESTUDIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS CENIZAS PROVENIENTES DE LA CALCINACIÓN DE LA *CORTADERIA SELLOANA* COMO POSIBLES MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN



- [13] *www.cymper.com*. (2014). Recuperado el 25 de Agosto de 2019, de <https://www.cymper.com/blog/apuntes-sobre-la-nomenclatura-y-propiedades-de-los-morteros-de-construccion/>
- [14] *www.sgs.es*. (s.f.). Recuperado el 20 de Agosto de 2019, de <https://www.sgs.es/es-es/environment/climate-change/biogenic-co2-emissions>