



Escuela de Caminos

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
UPC BARCELONATECH

Diseño, análisis y aplicaciones de eco-materiales en base cemento

Trabajo realizado por:

Justina Isabel Ortiz Mata

Dirigido por:

Dra. Lucía J Fernández Carrasco

Máster en:

Ingeniería Ambiental

Barcelona, España

Junio 2021

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Agradecimientos

Agradecer a mis familiares, tutores, profesores y amigos que han estado involucrados en el proceso de formación de este máster, aquellos que han apoyado y formado parte de este objetivo de crecimiento profesional, y los que han estado convencidos de que sería un éxito.

A todos ellos, muchas gracias.

Resumen

Este trabajo presenta en primer lugar, una revisión bibliográfica sobre los cementos de sulfoaluminato de calcio y sobre la utilización de subproductos o residuos, como beneficio medioambiental y, en segundo lugar, un trabajo experimental llevado a cabo en el Laboratorio de Materials de Construcció de l'Escola de Camins, Canals i Ports de Barcelona de la Universitat Politécnica de Catalunya (UPC).

En la parte experimental, se ha evaluado el efecto de la incorporación de cenizas volantes (CV), en distintas proporciones, al Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA) sobre algunas de sus propiedades físicas y químicas – mineralogía, propiedades físicas y mecánicas a edades iniciales y avanzadas.

El proceso de fabricación del CSA posee menor impacto ambiental que el Cemento Portland (CP) debido a que requiere menor temperatura para la producción del clínker. Las fases mineralógicas que constituyen este cemento y que al hidratarse con agua proporciona resistencia mecánica a compresión al material se forman a menor temperatura. Además, una vez clínquerizado, necesita menos energía para su trituración y, por tanto, de modo general menos combustible.

La parte experimental aborda la preparación y estudio de pastas y morteros, a las edades de 7, 28 y 90 días de curado. Además de estudiar al CSA como referencia, se ha sustituido de manera parcial en distintas proporciones desde 10 hasta 90% el CSA por cenizas volantes (10 composiciones en total).

Se analizó la formación de fases mineralógicas a las distintas edades y así si se produce la activación de este subproducto por medio de las reacciones durante el proceso de hidratación del CSA. Tras esta fase, y analizando los resultados, se han seleccionado las composiciones del 0, 30, 50 y 70% de sustitución del CSA por las CV para estudiar sus distintas propiedades físicas.

Estos procedimientos se han llevado a cabo mediante dos campañas experimentales: 1) Estudio de pastas para analizar la formación de fases mediante la técnica instrumental de difracción de rayos X y la medida de los tiempos de fraguado por la aguja de Vicat; 2) Elaboración de morteros de dimensiones de (28,5x2,5x2,5) cm para determinar las variaciones volumétricas y de (16x4x4) cm para medir las resistencias mecánicas a flexión y compresión.

Las componentes mineralógicas principales del CSA sin hidratar, son la yelemita $\text{Ca}_4(\text{AlO}_2)_6\text{SO}_4$ y anhidrita CaSO_4 que al hidratarse pasan a formar etringita. Cuando se sustituyen diferentes proporciones por las CV, los resultados obtenidos por difracción de rayos x (DRX) indicaron la formación de fases cristalinas de etringita, y aunque no se descarta la activación de la CV solo con los procesos de hidratación del cemento, ya que sus fases (en su mayoría mullita, magnetita, hematita y cuarzo) se mantuvieron invariables en su forma anhidra y luego de la hidratación, sería necesario un estudio más en profundidad de fases amorfas para realizar esta comprobación.

Es conocido, que el CSA tiene unos tiempos de fraguado cortos comparados con el CP. Sin embargo, al aumentar el contenido de CV en las mezclas, se retarda el tiempo de fraguado, pasando de 24 a 34 minutos atendiendo al porcentaje de sustitución. En cuanto a las variaciones volumétricas, se obtuvo que, en las primeras edades desde los 15 minutos desde el desmoldado hasta las 2 horas respecto a la primera medición, las probetas experimentaron retracciones en todas las composiciones analizadas; pero, para las edades de 24, 48h hasta el día 7 días las probetas se expandieron y a los 28 días presentaron nuevamente contracciones, teniendo en cuenta que estas variaciones volumétricas no fueron mayores a los 10mm que las especificaciones técnicas y normativa exige. La composición con 70% de sustitución de CSA por CV reflejó un comportamiento más diverso en términos de variaciones volumétricas.

Por último, las resistencias de flexión y compresión fueron disminuyendo a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución, especialmente en los mayores porcentajes de sustitución; aunque para el 30% de sustitución de CSA por CV presentó resistencia similar al mortero de referencia.

Palabras claves: clinker, cemento de sulfoaluminato de calcio, cenizas volantes, formación de fases hidratadas, propiedades físicas

Abstract

This work presents, firstly, a bibliographic review on calcium sulfoaluminate cements and on the use of subproducts or residues, as an environmental benefit and, secondly, an experimental work carried out in the Laboratory of Materials de Construcció de l'Escola de Camins, Canals i Ports de Barcelona de la Universitat Politécnica de Catalunya (UPC).

In the experimental part, the effect of the incorporation of fly ash (CV), in different proportions, to the Calcium Sulfoaluminate Cement (CSA) on some of its physical and chemical properties - mineralogy, physical and mechanical properties at ages has been evaluated. initial and advanced.

The CSA manufacturing process has less environmental impact than Portland Cement (CP) because it requires a lower temperature for the production of clinker. The mineralogical phases that constitute this cement and that when hydrated with water provide mechanical resistance to compression to the material, are formed at a lower temperature. Furthermore, once it has been clinched, it requires less energy to grind and, therefore, generally less fuel.

The experimental part deals with the preparation and study of pastes and mortars, at the ages of 7, 28 and 90 days of curing. In addition to studying the CSA as a reference, the CSA has been partially replaced in different proportions from 10 to 90% by fly ash (10 compositions in total).

The formation of mineralogical phases at different ages was analyzed and thus if the activation of this by-product occurs through the reactions during the hydration process of the CSA. After this phase, and analyzing the results, the compositions of 0, 30, 50 and 70% substitution of CSA for CVs have been selected to study their different physical properties.

These procedures have been carried out by means of two experimental campaigns: 1) Study of pastes to analyze the formation of phases by means of the instrumental technique of X-ray diffraction and the measurement of the setting times by the Vicat needle; 2) Preparation of mortars with dimensions of (28.5x2.5x2.5) cm to determine the volumetric variations and of (16x4x4) cm to measure the mechanical resistance to bending and compression.

The main mineralogical components of CSA without hydration are the yelemite $\text{Ca}_4(\text{AlO}_2)_6\text{SO}_4$ and anhydrite CaSO_4 which, when hydrated, form ettringite. When different proportions are substituted for CVs, the results obtained by x-ray diffraction (XRD) indicated the formation of ettringite crystalline phases, and although the activation of CV only with cement hydration processes is not ruled out, since its phases (mostly mullite, magnetite, hematite and quartz) remained unchanged in their anhydrous form and after hydration, a more in-depth study of amorphous phases would be necessary to carry out this verification.

It is known that CSA has short setting times compared to CP. However, by increasing the content of CV in the mixtures, the setting time is delayed, going from 24 to 34 minutes depending on the percentage of substitution. Regarding the volumetric variations, it was obtained that, in the first ages from 15 minutes from the demoulding to 2 hours with respect to the first measurement, the specimens experienced retractions in all the compositions analyzed; But, for the ages of 24, 48h until day 7, the test tubes expanded and after 28 days they presented contractions again, taking into account that these volumetric variations were not greater than 10mm that the technical specifications and regulations require. The composition with 70% substitution of CSA by CV reflected a more diverse behavior in terms of volumetric variations.

Lastly, the bending and compression strengths decreased as the percentage of substitution increased, especially in the higher percentage of substitution; although for the 30% substitution of CSA by CV it presented resistance similar to the reference mortar.

Keyword: clinker, calcium sulfoaluminate cement, fly ash, formation of hydrated phases, physical properties

Índice

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN.....	I
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estructura del documento.....	3
CAPÍTULO II - ESTADO DEL ARTE	II
2.1 Introducción: Problemática ambiental	4
2.2 Cemento	6
2.3 Cemento Portland	6
2.3.1 Fabricación del Cemento Portland.....	7
2.3.2 Nomenclaturas usuales	7
2.3.3 Componentes del cemento Portland	8
2.3.3.1 Componentes principales.....	8
2.3.3.2 Componentes adicionales minoritarios	9
2.3.4 Cambios de sustancias que tienen lugar en la hidratación del CP	10
2.3.4.1 Hidratación del cemento portland	10
2.3.4 Propiedades del cemento Portland.....	11
2.4 Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA)	11
2.4.1 Clinker de cemento de Sulfoaluminato de calcio.....	12
2.4.2 Hidratación de los cementos de sulfoaluminato de calcio.....	13
2.5 Cenizas volantes	14
2.5.1 Activación de cenizas volantes.....	17
2.5.2 Propiedades físicas de las cenizas volantes	17
CAPÍTULO III - MATERIALES Y MÉTODOS	III
3.1 Materiales	18
3.1.1 Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA)	18
3.1.2 Cenizas volantes (CV)	19
3.1.3 Arena silíceo normalizada	19
3.1.4 Agua.....	19
3.2 Métodos	19
3.2.1 Campaña en pastas	20
3.2.1.1 Amasado de las pastas	20
3.2.1.2 Desmoldado de las muestras	20
3.2.1.3 Caracterización por Difracción de Rayos X.....	21
3.2.1.3 Tiempos de fraguado.....	21
3.2.2 Campaña en morteros.....	23

3.2.2.2 Resistencias mecánicas	24
3.2.2.3 Variación volumétrica (Retracción/Contracción).....	25
CAPÍTULO IV - RESULTADOS.....	IV
4.1 Campaña en pastas	26
4.1.1 Difracción de Rayos X (DRX).....	26
4.1.1.1 Caracterización microestructural de las materias primas.....	26
4.1.1.2 Caracterización microestructural de las pastas	27
4.1.1.3 Resumen del comportamiento de la hidratación de las distintas proporciones	32
4.1.1.4 Conclusiones del ensayo DRX.....	34
4.1.1.5 Justificación de selección de composiciones para otros ensayos.....	34
4.1.2 Tiempos de fraguado inicial y final.....	34
4.2 Campaña en morteros.....	37
4.2.1 Ensayo de expansión volumétrica: comportamientos de la retracción/contracción	37
4.2.2 Resistencias mecánicas	41
4.2.2.1 Ensayo a flexión.....	41
4.2.2.2 Ensayo a la compresión.....	42
4.3 Resumen de los resultados de las propiedades físicas analizadas.....	44
4.4 Aplicaciones.....	44
4.4.1 Aplicaciones para las designaciones de CSA07	44
4.4.2 Aplicaciones para las designaciones de CSA05	46
4.4.3 Aplicaciones para las designaciones de CSA03	47
CAPÍTULO V - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	V
CAPÍTULO VI - BIBLIOGRAFÍA	VI
CAPÍTULO VII – ANEJOS.....	VII

Índice de tablas

Tabla 1. Tipo de cemento y composiciones. Fuente: UNE EN 197-1	6
Tabla 2. Composición típica del clínker del cemento Portland. Fuente: Sanjuán, M. & Chinchón, S. 2004.....	8
Tabla 3. Comparación de fases del CP y CSA. Fuente: Patente Europea 2 602 154	12
Tabla 4. Composición química de las cenizas volantes según el tipo del carbón del que proceden. Fuente: Vadillo et al., 1995	16
Tabla 5. Composición mineralógica de las cenizas volantes, en % peso. Fuente: Fly Ash Resource Center, 2001.....	17
Tabla 6. Propiedades físicas del CSA utilizados en el ensayo. Fuente: Ficha técnica i.tech ALI CEM GREEN	18
Tabla 7. Composición química tipo del CSA. Fuente: Patente Europea 2 602 154	18
Tabla 8. Composición química de las cenizas volantes usadas. Fuente: Vadillo et al., 1995.....	19
Tabla 9. Distribución granulométrica de la arena de referencia CEN	19
Tabla 10. Composiciones de CSA/CV para ser analizadas.....	20

Tabla 11. Dosificación para ensayo de tiempos de inicio y final de fraguado.	22
Tabla 12. Composiciones y pesos para utilizar en el ensayo de tiempos de fraguado. Fuente: edición propia.	23
Tabla 13. Dosificación estándar para los morteros. Fuente: UNE EN 196-1.....	24
Tabla 14. Composiciones y pesos para utilizar en los morteros. Fuente: edición propia.....	24
Tabla 15. Edades establecidas para la toma de longitudes, que abarcan desde las primeras edades del desmoldado hasta edades más avanzadas de 28 días.....	25
Tabla 16. Tiempo de fraguado inicial y final de la denominación CSA10. Fuente: edición propia, ensayo realizado en la UPC	34
Tabla 17. Tiempo de fraguado inicial y final de la denominación CSA07. Fuente: edición propia, ensayo realizado en la UPC	35
Tabla 18. Tiempo de fraguado inicial y final de la denominación CSA05. Fuente: edición propia, ensayo realizado en la UPC	35
Tabla 19. Tiempo de fraguado inicial y final de la denominación CSA03. Fuente: edición propia, ensayo realizado en la UPC	36
Tabla 20. Resultado de la variación volumétrica para CSA 10. Fuente: edición propia, toma de datos realizados en la UPC	37
Tabla 21. Resultado de la variación volumétrica para CSA07. Fuente: edición propia, toma de datos realizados en la UPC	38
Tabla 22. Resultado de la variación volumétrica para CSA05. Fuente: edición propia, toma de datos realizados en la UPC	39
Tabla 23. Resultado de la variación volumétrica para CSA03. Fuente: edición propia, toma de datos realizados en la UPC	40
Tabla 24. Resultados del ensayo de la resistencia a la flexión de morteros de CSA con % de sustitución por cenizas volantes. Fuente: edición propia mediante datos obtenidos en el laboratorio de la UPC	42
Tabla 25. Resumen de los resultados de los ensayos de tiempos de fraguado y resistencia a la compresión realizados a las designaciones seleccionas.	44
Tabla 26. Intensidades de la etringita, yelemita, mullita y cuarzo. Fuente: DRX de las denominaciones a los 7 días.	52
Tabla 27. Intensidades de la etringita, yelemita, mullita y cuarzo. Fuente: DRX de las denominaciones a los 28 días.	52
Tabla 28. Intensidades de la etringita, yelemita, mullita y cuarzo. Fuente: DRX de las denominaciones a los 90 días.	52
Tabla 29. Lecturas realizadas a las probetas para ensayo de las variaciones volumétricas.	53
Tabla 30. Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión de morteros de CSA con % de sustitución por cenizas volantes, selección de datos y nuevo cálculo del promedio mediante el criterio de Chauvenets. Fuente: edición propia mediante datos obtenidos en el laboratorio de la UPC	54

Índice de figuras

Figura 1. Esquema general de la fabricación del cemento. Fuente: Sanjuán, M. & Chinchón, S. 2004.....	7
Figura 2. Diagrama ternario de fases SiO ₂ -CaO-Al ₂ O ₃ de algunos materiales alternativos.	14
Figura 3. Resistencia a la compresión teórica del CSA utilizado. Fuente: Ficha técnica i.tech ALI CEM GREEN	18
Figura 4. Ensayo de fraguado inicial y final durante y después de su realización. Fuente: toma propia en laboratorio de la UPC.....	23

Figura 5. Morteros fabricados durante el curado con las designaciones de CSA/CV seleccionadas.	25
Figura 6. DRX del cemento de sulfoaluminato de calcio (Y-Yelemita, A-Anhidrita y - belita).....	26
Figura 7. DRX de la ceniza volante (M-mullita, Mt-magnetita, Q-cuarzo y H-hematita).	26
Figura 8. DRX CSA10. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.....	27
Figura 9. DRX CSA09. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.....	28
Figura 10. DRX CSA08. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.....	28
Figura 11. DRX CSA07. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.....	29
Figura 12. DRX CSA06. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.....	29
Figura 13. DRX CSA05. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.....	30
Figura 14. DRX CSA04. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.....	30
Figura 15. DRX CSA03. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.....	31
Figura 16. DRX CSA02. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.....	31
Figura 17. DRX CSA01. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.....	32
Figura 18. Comportamiento del diafractograma de la posición $2\theta = 9,10^\circ$ (etringita), fase hidratada del CSA. Fuente: edición propia.....	32
Figura 19. Comportamiento del diafractograma de la posición $2\theta = 23,70^\circ$ (Yelemita), fase anhidra del CSA. Fuente: edición propia.....	33
Figura 20. Comportamiento del diafractograma de la posición $2\theta = 26,70^\circ$ (cuarzo). Fase anhidra de la CV. Fuente: edición propia.....	33
Figura 21. Tiempos de fraguado de las composiciones analizadas. Fuente: edición propia	36
Figura 22. Representación de las variaciones volumétricas de la designación CSA10. Fuente edición propia.....	38
Figura 23. Representación de las variaciones volumétricas de la designación CSA07. Fuente edición propia.....	39
Figura 24. Representación de las variaciones volumétricas de la designación CSA05. Fuente edición propia.....	39
Figura 25. Representación de las variaciones volumétricas de la designación CSA03. Fuente edición propia.....	40
Figura 26. Resultados promedio de los resultados de ensayos de variación volumétrica de las designaciones analizadas. Fuente: elaboración propia por datos obtenidos en laboratorio de la UPC.....	41
Figura 27. Resultados promedios del ensayo de la resistencia a la flexión de morteros de CSA con % de sustitución por cenizas volantes. Fuente: edición propia mediante datos obtenidos en el laboratorio de la UPC	42
Figura 28. Resultados promedios del ensayo de la resistencia a la compresión de morteros de CSA con % de sustitución por cenizas volantes. Fuente: edición propia mediante datos obtenidos en el laboratorio de la UPC	43
Figura 29. Aplicación de CSA07. Reparación de emergencia de pavimentos de hormigón. Fuente: F&H Cement.....	44
Figura 30. Aplicación de CSA07. Morteros proyectados.....	45
Figura 31. Aplicación de CSA07. Elementos estructurales.....	45
Figura 32. Aplicaciones de CSA05. Elaboración de muebles de hormigón	46
Figura 33. Aplicaciones de CSA05. Revestimientos e impresiones de hormigón	46
Figura 34. Aplicaciones de CSA05. Albañilería	47
Figura 35. Aplicaciones de CSA05. Encapsular residuos peligrosos.	47

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El hormigón es indispensable para satisfacer las necesidades de infraestructura, industria y vivienda de la sociedad moderna ya que son producido con materias primas fácilmente disponibles, fácil de usar y con buena resistencia y durabilidad. Los hormigones hechos con ligantes hidráulicos (casi todos a base de cemento Portland), son los materiales de construcción más utilizados en todo el mundo en términos de volumen y, como tales, tienen un gran impacto en el medio ambiente.¹

Se estima que la industria del cemento Portland genera aproximadamente el 5% de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂) a nivel mundial, emite 0,90t de CO₂ por cada tonelada de cemento producido.² Muchas pruebas científicas vinculan el cambio climático con las emisiones de Gas de Efecto Invernadero (GEI), entre los cuales el dióxido de carbono (CO₂) se encuentra entre las más importantes y representa el 82% del total.

Las emisiones de GEI relacionadas con el cemento se originan en la quema de combustibles fósiles en las operaciones de fabricación (40%), actividades de transporte (5%) y generación de electricidad para la molienda del clínker (5%); las restantes emisiones se originan en el proceso de fabricación que convierte la piedra caliza (CaCO₃) en óxido de calcio (CaO), es químicamente imposible esta conversión sin generar CO₂.³

En este estudio se lleva a cabo una solución alternativa para la reducción de estas emisiones de CO₂ mediante:

- La sustitución del Cemento Portland (CP) por un cemento más ecológico como el **Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA)** para la fabricación de morteros u hormigones atendiendo a su resistencia mecánica;
- Y el uso de una puzolana como las **cenizas volantes (CV)** en las composiciones para disminuir la proporción del cemento utilizado.

El Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA) es una alternativa prometedora de baja de huella de CO₂ al cemento Portland debido a la diferencia en la cantidad de energía utilizada para producción (temperaturas más bajas en el horno, menor energía para moler y utilización de subproductos industriales)⁴; además de la sustitución en las proporciones de las principales materias primas utilizadas para la fabricación: 41,1% de bauxita, 29, 3% de caliza y 29,6% de yeso⁵ en lugar de los 67% de caliza, 30% de arcilla y 3% de otros componentes que se utiliza en el Portland^{6 7}, lo que da lugar a una composición mineralógica diferente. El CSA tiene muchas propiedades específicas en comparación con el CP como fraguado y endurecimiento rápido y reducción de la contracción.

Las ventajas medioambientales del uso de puzolanas (cenizas volantes) en la composición de los hormigones o morteros son la disminución de la contaminación del aire, suelo y aguas subterráneas, el aumento de la vida útil de los vertederos y la posible encapsulación de contaminantes (metales pesados) nocivos para el medio ambiente y la salud. La creciente demanda de energía eléctrica en las centrales térmicas que utilizan como combustible el carbón, han provocado un aumento en la cantidad de residuos

proveniente de la combustión: escorias y cenizas volantes. La combustión del carbón según ECOBA (European Coal Combustion Products Association) produce en Europa alrededor de 55 millones de toneladas al año de este residuo, lo que garantiza el constante suministro de este material.

La metodología empleada en este estudio se llevará a cabo mediante dos campañas experimentales: en pastas y morteros, respectivamente. Para la selección de las mezclas a utilizar, que se realizará atendiendo a su microestructura mediante Difracción de Rayos X, se elaborarán pastas de diferentes composiciones de CSA y CV con el fin de estudiar el proceso de hidratación a los 7, 28 y 90 días de curado. Una vez seleccionadas las mezclas se determinará el tiempo de fraguado inicial y final. La segunda campaña experimental consiste en preparar probetas de mortero para medir su variación volumétrica y resistencias mecánicas.

1.2 Objetivos

El objetivo general que persigue este Trabajo de Fin de Máster es diseñar y aplicar un material de base cemento – eco-material – que sea mas amigable con el medio ambiente: su producción cause menos impacto ambiental; y estudiar sus propiedades químicas y físicas para poder proporcionar aplicaciones a este producto. Para determinar sus posibles aplicaciones constructivas, se analizan las propiedades físicas: las resistencias mecánicas, tiempos de fraguado y variaciones volumétricas de mezclas de cemento alternativo al Portland con menor impacto ambiental como el Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA) en cuyas composiciones es sustituido con diferentes proporciones de cenizas volantes procedentes de una central térmica.

Para alcanzar el propósito de este trabajo se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar los procesos de hidratación y formación de fases de la influencia de las diferentes sustituciones del cemento por las cenizas volantes.
- Caracterizar la microestructura de los materiales y comparar con las mezclas hidratadas o activadas.
- Seleccionar atendiendo a su microestructura (formación de fases o activación de las mezclas) las proporciones de mezclas más adecuadas para los ensayos de las propiedades físicas.
- Analizar los resultados de los ensayos realizados de acuerdo con la influencia de las sustituciones.
- Exponer la viabilidad de estos productos para uso de material de construcción y aplicación en Ingeniería Civil.

1.3 Estructura del documento

Este trabajo se encuentra dividido en siete capítulos, en el cual se describe de forma ordenada todo el proceso realizado para lograr su concepción. A continuación, se explica brevemente el contenido de cada capítulo:

En el **primer capítulo** se realiza una breve introducción al tema a analizar, se describe el planteamiento general del problema, la justificación por la que se lleva a cabo y las propuestas para el desarrollo de trabajo, establecidos en el objetivo general y los específicos.

El **segundo capítulo** está constituido por el estado del arte en el que se realiza la revisión bibliográfica donde se exponen los problemas medioambientales del uso del Cemento Portland; la generación de las cenizas volantes en las centrales termoeléctricas; la solución alternativa del uso de un cemento con menor impacto ambiental como el de sulfoaluminato de calcio con sustituciones de este residuo industrial. También se explican los conceptos, el proceso de hidratación, las propiedades mecánicas y aplicaciones de las cenizas volantes y este cemento en contraste con el cemento Portland.

En el **tercer capítulo** se describe la campana experimental y metodología que se pretende seguir para obtener la caracterización de las diferentes muestras, con el fin de lograr los objetivos propuestos, en él se muestran las características de los diferentes materiales componente utilizados, las dosificaciones de las mezclas. Además, se exponen los procedimientos de cada ensayo y la instrumentación utilizada para cada una de ellas.

En el **cuarto capítulo** se presentan los resultados obtenidos durante la campaña experimental y sus análisis atendiendo a las proporciones de sustitución.

El **capítulo quinto** agrupa las conclusiones y propuestas de continuidad que se han obtenido durante la investigación, realización de los ensayos y las conclusiones que se han podido extraer del análisis de resultados.

Finalmente, el **sexto capítulo** está relacionado con el capítulo de referencias donde se recogen las diferentes fuentes consultadas, tanto las que aparecen citadas en el texto como las que han servido para mejorar la comprensión de los diferentes aspectos del proyecto. Y el **séptimo capítulo** es el correspondiente a los anejos, proporciona información adicional de los resultados presentados.

CAPÍTULO II - ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción: Problemática ambiental

Durante la última década, el cambio climático ha sido el problema ambiental más discutido: “Detener el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y mantener el crecimiento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales” son los objetivos más importantes de la política del cambio climático establecidos en el acuerdo de París. En busca de estos logros, se presta mayor atención al desarrollo de una economía, tecnologías y energías renovables bajas en carbono. La implementación exitosa de estas herramientas requiere la participación ciudadana desde el apoyo a la implementación de políticas hasta el cambio de comportamiento activo.⁸

Entre los principales gases de efecto invernadero el más preocupante es el dióxido de carbono (CO₂) por su responsabilidad en el cambio climático, para que el mundo pueda alcanzar estas metas climáticas se ha propuesto desplegar todas las vías posibles para reducir las emisiones de carbono. La construcción es uno de los mayores consumidores de materias primas. El sector cementero es responsable de alrededor del 5-8% de las emisiones mundiales de CO₂ que son contribuidos por la descomposición de la piedra caliza (60%) y combustión de combustibles fósiles (40%).^{9 10}

El hormigón es el material de construcción más utilizado en el mundo debido a su buen rendimiento mecánico, longevidad, bajo costo y amplia disponibilidad¹¹; cada año la industria del hormigón emplea 1,6 billones de toneladas de cemento en su fabricación y emite aproximadamente 1 tonelada de CO₂ a la atmósfera por cada tonelada de producción.⁹ La demanda mundial de cemento fue de 2,6Gt en 2006, es estimada en 3,5Gt en 2015 y se prevé que sea de 4,4Gt en 2050.¹⁰

“Desarrollo novedoso, cementos bajos en carbono” es una de las iniciativas de un esfuerzo global de 25 productoras de cemento que operan bajo el paraguas del Mundo del Consejo Empresarial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés). El Cemento Portland (CP) es el tipo de cemento hidráulico más común de uso general en todo el mundo. Numerosos aglutinantes cementosos alternativos al CP se han propuesto para reducir las emisiones asociadas de CO₂, incluyendo cemento activado por álcali, cemento de magnesita, cemento de aluminato de calcio, cemento de sulfoaluminato de calcio (CSA), cemento de sulfoaluminato de calcio-ternesita y/o diversas mezclas de estos cementos.¹⁰

De todas estas alternativas al CP el CSA es el más prometedor. Composicionalmente, la diferencia entre CSA y CP es que el primero se basa en una mineralogía diferente que contiene Yelemita en lugar de alita como el constituyente principal.

En la actualidad, los cementos que contienen Yelemita (C₄A₃S̄) o Ca₄Al₆O₁₂(SO₄) en su composición están atrayendo un interés considerable por sus inherentes bajas emisiones del CO₂ durante la fabricación y también porque ofrecen la posibilidad de propiedades y rendimientos en los morteros y hormigones resultantes, como es el caso

de cementos de sulfoaluminato cálcico ricos en Yelemita (CSA, contenido de Al_2O_3 entre 30 y 40% en peso).¹²

Desde la perspectiva del cambio climático, las importancias principales del CSA respecto al CP son:

- Menores emisiones de CO_2 por clínker unitario tanto en su materia prima como las derivadas del combustible.¹³
- Reducción significativa del combustible debido al menor consumo de energía térmica, esto principalmente a que el clínker del CSA requiere temperaturas más bajas (aproximadamente 200 °C) menos que el CP.¹⁴
- El clínker de CSA es más fácil de moler que el de CP lo que conduce a una reducción indirecta del CO_2 por menor requerimiento de energía eléctrica.¹⁵
- El cemento de CSA es menos denso que CP (aproximadamente 7%) lo que sugiere una mayor reducción de emisiones indirectas de CO_2 mediante el transporte del cemento en volumen constante.¹⁶

Otra manera de cumplir con los objetivos sobre el cambio climático es mediante la sustitución parcial del cemento por subproductos industriales que presentan comportamiento puzolánico y que se les puede incorporar para mejorar algunas de sus propiedades, entre ellas se encuentran las escorias y cenizas volantes. Una ventaja de su uso en la composición del cemento es la disminución de la contaminación del aire, suelo y aguas subterráneas, el aumento de la vida útil de los vertederos y la posible encapsulación de contaminantes (metales pesados) nocivos para el medio ambiente y la salud.

La creciente demanda de energía eléctrica en las centrales térmicas que utilizan como combustible el carbón, han provocado un aumento en la cantidad de residuos proveniente de la combustión: escorias y cenizas volantes. La combustión del carbón según ECOBA (European Coal Combustion Products Association) produce en Europa alrededor de 55 millones de toneladas al año de este residuo.

Teniendo en cuenta que por cada tonelada de carbón pulverizado que se quema se producen aproximadamente 200kg de cenizas volantes. En Europa, en la mayoría de los casos se tiende a utilizar los residuos de combustión del carbón en:

- como media un 40% como material de relleno en la restauración en minería;
- y casi el 50% se recicla en la industria del cemento y hormigón.

La utilización de cenizas volantes en la fabricación de hormigón tiene como finalidad la reducción de la cantidad de cemento; así pues, las cenizas volantes pueden utilizarse en el hormigón de dos maneras: como elementos activos aprovechando su puzolanidad (capacidad para combinarse con la cal para formar un aglomerado hidráulico); como elemento inerte (árido) mejorando la granulometría de la arena; o para ambas finalidades.¹⁷

2.2 Cemento

De acuerdo con la UNE EN 197-1 el cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, cuando es amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

En la tabla 1 se presentan los productos de la familia de los cementos comunes cubiertos por la Norma EN 197-1 y su designación. Se agrupan en cinco tipos principales como se indica a continuación:

Tabla 1. Tipo de cemento y composiciones. Fuente: UNE EN 197-1

Tipos principales	Denominación	Designación
CEM I	Cemento Portland	CEM I
CEM II	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S
		CEM II/B-S
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P
		CEM II/B-P
		CEM II/A-Q
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/B-Q
		CEM II/A-V
		CEM II/B-V
		CEM II/A-W
	Cemento Portland con esquisto calcinado	CEM II/B-W
		CEM II/A-T
	Cemento Portland con caliza	CEM II/B-T
		CEM II/A-L
		CEM II/B-L
		CEM II/A-LL
Cemento Portland con compuesto	CEM II/B-LL	
	CEM II/A-M	
CEM III	Cemento de horno alto	CEM II/B-M
		CEM III/A
		CEM III/B
CEM IV	Cemento puzolánico	CEM III/C
		CEM IV/A
CEM V	Cemento compuesto	CEM IV/B
		CEM V/A
		CEM V/B

2.3 Cemento Portland

De todos los cementos mencionados anteriormente, el Cemento Portland es el conglomerante hidráulico más extensamente utilizado y de mayor producción en el mundo. Su fabricación es un proceso complejo, en el que materias primas con escaso valor se transforman en un material de elevadas prestaciones tecnológicas.

2.3.1 Fabricación del Cemento Portland

La fabricación del cemento es un proceso industrial que se realiza en instalaciones de gran escala. Básicamente, consiste en⁶:

- Obtención, almacenamiento y preparación de materias primas (caliza, marga, arcilla) que son finamente molidas para obtener el crudo.
- Almacenamiento y preparación de combustibles.
- Cocción del crudo en un horno rotatorio hasta temperaturas de 1450 °C (2000 °C de temperatura de llama) para la obtención de clínker de cemento.
- Molienda conjunta del clínker con otros componentes (cenizas volantes, escoria, puzolana, yeso, etc.) para obtener el cemento.
- Almacenamiento, ensecado y expedición del cemento.

En la figura 1 se muestra un esquema general de la fabricación del cemento.



Figura 1. Esquema general de la fabricación del cemento. Fuente: Sanjuán, M. & Chinchón, S. 2004

La fabricación de Cemento Portland consume grandes cantidades de recursos energéticos y medioambientales, para la producción de 1 tonelada de clínker de cemento se requieren 1,6 toneladas de materias primas y 0,15 toneladas de combustible, considerado como carbón de alta calidad.¹

Por cada tonelada de CP producido se emiten a la atmósfera 0,54 toneladas de CO₂ proveniente solo de la descarbonatación de la caliza en los hornos de clinkerización. Por otro lado, hay que tener en cuenta el consumo energético adicional que supone la oxidación del combustible en el horno, en el que se liberan 0,35 toneladas de CO₂ y los procesos de molienda, para los que se requieren una media de 110 kWh de electricidad, lo que supone 0,09 toneladas de CO₂ indirectas. Por lo que, la producción de una tonelada de cemento Portland libera aproximadamente 0,98 toneladas de CO₂, lo que supone el 5% de las emisiones antropogénicas de este gas de efecto invernadero.¹⁸

2.3.2 Nomenclaturas usuales

La nomenclatura usual de los compuestos en la bibliografía internacional sobre el cemento portland, se ha simplificado con arreglo al siguiente esquema:

Se sustituyen las fórmulas de los óxidos fundamentales CaO; SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ por las letras mayúsculas C, S, A y F respectivamente, indicando su relación molar con un coeficiente numérico como subíndice. De este modo, por ejemplo, el silicato tricálcico 3CaO·SiO₂, se transcribe como C₃S.¹⁹

Cuando estos compuestos se hidratan y cristalizan, incorporando H_2O , se transcribe análogamente el agua como H, así la fase SCH representa el hidrato del silicato cálcico $SiO_2 \cdot CaO \cdot H_2O$. Análogamente, las fases hidro-aluminato se representa con ACH, los correspondientes subíndices indican el número de moles de cada óxido que integran la molécula.

Algunos autores emplean una \bar{s} minúscula con una raya horizontal en su parte superior para designar al anhídrido sulfúrico SO_3 y así evitar la confusión con la S mayúscula destinada a representar al SiO_2 .

2.3.3 Componentes del cemento Portland

La norma europea UNE EN 197-1 define los posibles componentes que en la actualidad pueden formar parte de un cemento Portland. Básicamente esos componentes pueden clasificarse en principales y adicionales.

2.3.3.1 Componentes principales

2.3.3.1.1 Clinker de cemento Portland (K)

El clinker del cemento Portland se obtiene por sinterización de una mezcla homogénea de materias primas: caliza, arcilla, arena, mineral de hierro y otros componentes en proporciones definidas (crudo, pasta o harina), con una composición química normalmente expresados en forma de óxidos: 67% de Óxido de calcio (CaO), 22% de Sílice (SiO_2), 5% de Alúmina (Al_2O_3), 3% de Óxido de hierro (Fe_2O_3) y de 3% de otros componentes. Esta mezcla se calienta hasta llegar a los rangos de temperatura de sinterización y se forman nuevos compuestos. El clinker aparece paulatinamente.^{6 20}

La composición mineralógica del clinker está constituida por cuatro fases mayoritaria: alita, belita, aluminato tricálcico y ferritoaluminato tetracálcico; también existen otras fases minoritarias como sulfatos alcalinos, óxido de magnesio y óxido de calcio (cal libre) esta última es fundamental en el proceso de producción y de calidad de un clinker.²⁰ Una composición típica de un clinker puede ser la mostrada en la tabla 2

Tabla 2. Composición típica del clinker del cemento Portland. Fuente: Sanjuán, M. & Chinchón, S. 2004

Fase	Fórmula	Abreviatura	% composición
Silicato tricálcico (alita)	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	61
Silicato bicálcico (belita)	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	15
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	12
Ferritoaluminato tetracálcico	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	8
Cal libre	CaO	C	1
Óxido de magnesio (periclasa)	MgO	M	1,5

- **Silicato tricálcico ($3CaO \cdot SiO_2$)**, es el compuesto con mayor contenido en el sistema binario $CaO-SiO_2$. Este determina de modo decisivo la mayoría de las propiedades del cemento, ya que las características resistentes y durables del mismo depende de la hidratación. El silicato tricálcico endurece rápidamente y alcanza gran resistencia cuando se muele finamente y se mezcla con agua hasta

formar una pasta. Se forma por reacción en estado sólido entre óxido de calcio y sílice también se puede producir a partir de caliza pura y cuarzo. La reacción es más rápida en presencia de una masa fundida de óxidos de calcio, aluminio y hierro (III) a unos 1450 °C.

- **Silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)**, se produce cuando el clínker de cemento no está totalmente saturado de óxido de calcio. Este se funde congruentemente a 2130 °C y se forma a temperaturas inferiores a 1000 °C en mezcla cruda en arcilla por reacción en estado sólido.
- **Ferritoaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)**, contribuye poco al endurecimiento hidráulico y contiene la mayor parte del hierro y del aluminio contenidos en el clínker de cemento. Es una fase presente en la disolución sólida con $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ferrito dicálcico) y 2CaO ($0,96 \text{ Al}_2\text{O}_3$, $0,31 \text{ Fe}_2\text{O}_3$) como límite en el clínker de cemento.
- **Aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$)**, es el compuesto con mayor contenido de CaO de las fases de aluminato. Reacciona rápidamente con el agua, sus propiedades hidráulicas no son muy acentuadas, pero mejora la resistencia inicial del cemento.
- **Cal libre (CaO) y periclasa (MgO)**, son compuestos minoritarios del clínker. Estos reaccionan con el agua para formar el hidróxido cálcico y el hidróxido de magnesio, que ocupan mayor espacio que los óxidos originales, por lo tanto, pueden provocar expansiones dañinas, por eso las normas limitan su uso.
- **Compuestos de metales alcalinos**, son componentes minoritarios del clínker que provienen de los materiales crudos y de las cenizas del combustible. El clínker contiene hasta 2% en peso de óxidos de metales alcalinos ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$) y hasta un 2% en peso de sulfatos de metal alcalino. La cantidad total de alcalino afecta de manera significativa al fraguado y al endurecimiento del cemento.

El clínker de cemento Portland es un material hidráulico que debe estar constituido, al menos de dos tercios de su masa, por silicatos de calcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ y $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) estando constituido el resto por fases del clínker conteniendo hierro y aluminio y otros componentes. La relación en masa $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ no debe ser menor de 2,0. El contenido de óxido de magnesio (MgO) no debe exceder del 5% en masa.

2.3.3.2 Componentes adicionales minoritarios

Son materiales minerales naturales o derivados del proceso de fabricación del clínker o cemento. Estos están correctamente seleccionados, homogeneizados, secados y pulverizados en función de su estado de producción o suministro. Su proporción se limita al 5% en peso.⁶

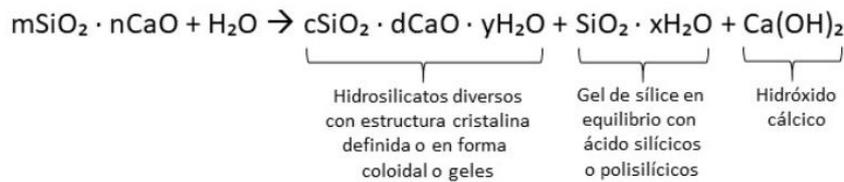
Los componentes adicionales minoritarios no aumentarán sensiblemente la demanda de agua del cemento, no disminuirán la resistencia del hormigón o del mortero en ningún caso, ni reducirá la protección de las armaduras frente a la corrosión. Estos componentes suelen mejorar las propiedades físicas del cemento, tales como la docilidad o la retención del agua. La información sobre estos componentes será facilitada por el fabricante cuando lo solicite el usuario.⁶

2.3.4 Cambios de sustancias que tienen lugar en la hidratación del CP

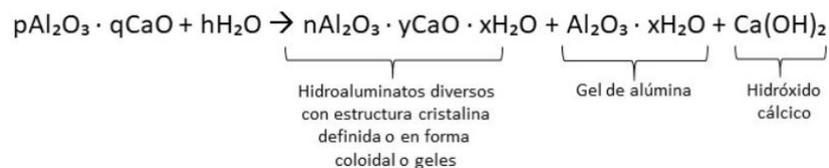
Las transformaciones químicas que tienen lugar durante la reacción de hidratación de los compuestos aglomerantes con el agua son de muy variada naturaleza y distintas según los componentes de los clínkeres: la razón CaO/SiO_2 , la concentración, el pH, la temperatura, etc.

A continuación, una idea esquemática de los tipos generales de sustancias que se forman comúnmente en todos ellos.¹⁹

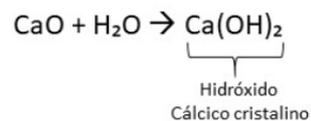
Los silicatos



Los aluminatos



CaO libre



2.3.4.1 Hidratación del cemento portland

Los silicatos

Dentro de los compuestos que se producen en la hidratación de los silicatos que componen los clínkeres de los cementos portland, existe una gran variedad de sustancias de composición general S C H. de entre estas sustancias se menciona la más importante, tanto en las pastas hidrolizadas de los cementos portland como en la hidratación de los silicatos puros C_3S y $\beta\text{-C}_2\text{S}$, que constituye el 75% de la composición del clinker de portland y que intervienen directamente en sus propiedades aglomerantes.¹⁹

Las sustancias de mayor interés que se forman en la hidratación de estos silicatos son las del grupo **tobermoritas**, su composición es muy próxima a la formulación $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$. Este material forma parte de los cementos naturales cal-sílice de algunas rocas metamórficas.

Los aluminatos

La hidratación de los aluminatos y ferroaluminatos contenidos en el clinker del cemento portland, dan lugar a fases hidratadas.

En la hidratación del cemento, que siempre ocurre en presencia de iones SO_4^- procedentes del yeso, se producen en primer lugar el trisulfoaluminato cálcico $3\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ o bien $3\text{C}\bar{S} \cdot \text{C}_3\text{A} \cdot \text{H}_{31}$ (o etringita) y posteriormente, cuando la concentración de iones SO_4^- decrece, se forma monosulfoaluminato $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ o bien $\text{C}\bar{S} \cdot \text{C}_3\text{A} \cdot \text{H}_{12}$, y se reduce el contenido de etringita.¹⁹

Después de eliminados los iones de SO_4^- en la pasta de cemento en hidratación, parece confirmarse la presencia de aluminato hidratado $\text{C}_4\text{A} \cdot \text{H}_{19}$ o de sus hidratos inferiores por deshidratación.

El ferroaluminato tetracálcico da lugar a una composición semejante, ferrito hidratado $\text{C}_4\text{A} \cdot \text{H}_{13}$ que, a su vez, origina análogamente un complejo monosulfato: $\text{C}_3\text{F} \cdot \text{C}\bar{S} \cdot \text{H}_{12}$.

2.3.4 Propiedades del cemento Portland

El cemento portland fragua y endurece al reaccionar químicamente con el agua. Cuando se dosifica y se mezcla apropiadamente con agua y árido, es capaz de producir un mortero u hormigón, que conserva su trabajabilidad durante un tiempo suficientemente largo y además es capaz de alcanzar buenos niveles de resistencia y una estabilidad de volumen a larga plazo.

2.4 Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA)

El término sulfoaluminato de calcio (CSA) debe reservarse para aquellos cementos con alto contenido de fase de yelemita o Sal de Klein ($\text{C}_4\text{A}_3\bar{S}$).

Los cementos de CSA se desarrollaron durante la década de 1970 debido principalmente a la actividad investigadora realizada por China Building Materials Academy, con la intención de fabricar tubos de hormigón autotensado para aprovechar las propiedades de expansión de este material; que se utilizan principalmente donde se requiere fraguado rápido, resistencia temprana o se requiere compensación por contracción.²¹ Sus principales fases cementante son: la Yelemita $\text{Ca}_4(\text{AlO}_2)_6\text{SO}_4$ (35-70%) en peso; belita $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (30%); ferrita C_4F ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) (10-30%) y yeso (15-25%)²².

Este material representa una alternativa interesante al cemento Portland por sus propiedades:

- Reducción del CO_2 emitido a la atmosfera (35-50%).
- Reducción del consumo de energía calorífica (35%) por su menor temperatura de calcinación (1200 °C frente a 1450-1500 °C del Clinker del cemento Portland).
- Menor consumo de energías renovables, al utilizar materiales como cenizas volantes, cenizas de fondo de las incineradoras y lodos anodizados procedentes de la industria del aluminio sin calcinar como sustituto de la bauxita.

2.4.1 Clinker de cemento de Sulfoaluminato de calcio

Actualmente existen diferentes métodos para la sinterización del clinker cementante. Los sistemas basados en sulfoaluminatos y fases que se forman en estado fundido disminuyen las temperaturas de formación del clinker, y por lo tanto conllevan a un ahorro de energía.²³

Un clinker que contiene C_2S y $C_4A_3\bar{S}$ se obtiene entre 1250 y 1300 °C, dando valores de resistencia de 29,4, 49,0 y 82,5 MPa en 3h, 1 día y 28 días, respectivamente, en comparación con los 23 MPa que alcanza un CP en 1 día.

El clinker para el cemento belita-sulfoaluminato puede ser producido en los sistemas $CaO-Al_2O_3-SiO_2-SiO_3$ (C-A-S- \bar{S}), con $C_4A_3\bar{S}$ y $\beta-C_2S$ como componentes principales²⁴.

El cemento de sulfoaluminato de calcio se obtienen habitualmente a escala industrial mediante la sinterización de materia primas homogenizadas, finamente divididas, naturales, como piedra caliza, arcilla y/o bauxita y yeso/semihidrato/anhidrita, como fuente de calcio, silicio/aluminio y azufre, respectivamente.

Los clinkers de CSA se preparan en hornos tubular rotatorios a temperaturas entre 1100-1350 °C, las reacciones de clinkering dependen ligeramente de la composición de la mezcla cruda y presentan un mecanismo y un contenido en fases significativamente diferente en comparación con el cemento Portland. En la tabla 3 se comparan las fases presentes en cemento Portland (CP) y cemento de sulfoaluminato.

Tabla 3. Comparación de fases del CP y CSA. Fuente: Patente Europea 2 602 154

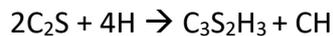
CPO	CSA
Temperatura [°C]	
1450	1250
Composición química [%]	
CaO [55-75]	CaO [40-70]
SiO ₂ [15-25]	SiO ₂ [2-40]
Al ₂ O ₃ [2-6]	Al ₂ O ₃ [5-40]
Fe ₂ O ₃ [0-6]	Fe ₂ O ₃ [0-15]
SO ₃ [1,5-4,5]	SO ₃ [5-25]
Composición mineralógica [%]	
C ₃ S [50-70]	
C ₂ S [10-40]	C ₂ S [2-70]
C ₃ A [0-15]	C ₄ A ₃ \bar{S} [10-75]
C ₄ AF [0-20]	C ₄ AF [0-30]
C \bar{S} [2-10]	C \bar{S} [5-30]
C [0-3]	Fases secundarias
Cc [0-5]	

Comparado con el clínker de cemento Portland:

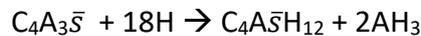
- El contenido de piedra caliza (carbonato cálcico) en la mezcla de materias primas es menor, lo cual permite reducir las emisiones de CO₂ durante el ciclo productivo (proceso de descarbonatación).
- La fabricación de clínker de sulfoaluminato de calcio (C₄A₃S) requiere de una menor temperatura de horno (<200 °C aproximadamente) y por siguiente un gasto menor de energía primaria en el ciclo productivo, lo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Alto contenido de materias primas recicladas (alrededor del 38%) reduce el consumo de recursos naturales.

2.4.2 Hidratación de los cementos de sulfoaluminato de calcio

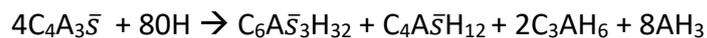
La belita (C₂S) presente en el cemento contribuye a la resistencia del cemento a medias y largas edades, además de aportar a la durabilidad de los cementos hidratados²⁴. La reacción hidratada del C₂S forma silicatos de calcio hidratado (gel C-S-H) e hidróxido de calcio como productos, se presenta con la siguiente ecuación:



El componente clave de la hidratación del sulfoaluminato de calcio (C₄A₃S̄, también conocido como yeélemita o compuesto de Klein) es su habilidad de formar etringita, esta es la fase o producto intermedio que se forma antes de terminar las reacciones de hidratación. El producto final de la hidratación del sulfoaluminato de calcio, es el monosulfato:



Sin embargo, cuando hay un exceso de agua, se forma etringita, monosulfato y gibsita, los cuales coexisten, pero la etringita finalmente se convierte en monosulfato:



Un balance apropiado de estas fases (belita y sulfoaluminato) pueden producir un alto valor a la resistencia a la compresión (>40 MPa en un día), estos cementos se pueden permitir hasta un 10% de cal libre.

Las fases de hidrato que se forman, (por ejemplo: etringita, monofases, etc.) pueden aglutinar y fijar de manera duradera una pluralidad de sustancias nocivas y elementos radiactivos²⁵ mediante la incorporación en la estructura cristalina de la fase de hidrato, adición de superficies de partículas, fijación en la pasta de cemento, precipitación (hidróxidos/carbonatos) otras dos fases con actividad hidráulica del cemento del sulfoaluminato de calcio son silicato dicálcico (C₂S) y ferrita aluminato tetracálcico (C₄AF) que, no obstante, contribuyen extraordinariamente a la resistencia final²⁶.

Durante la hidratación se forma la fase expansiva etringita (3CaO, Al₂O₃, 3CaSO₄, 32H₂O) que cristaliza y rellena los poros y es, principalmente, responsable de la

expansión de la pasta de cemento de la fase (C-A-S-H) gel; esta expansión compensa la retracción autógena inicial y la posterior que se origina en la pasta cementante endurecida (drying shrinkage) y elimina o reduce, en gran medida su fracturación; para reducir la retracción se utilizan relaciones $a/c = 0,45-0,55$.

Otras propiedades de estos materiales cementíceos son frente al cemento Portland son^{21 22}:

- Tiempos de fraguado corto
- Endurecimiento rápido (puede ser necesario utilizar retardadores de fraguado)
- Resistencia elevada temprana (30 Mpa en 24h)
- Menor retracción
- Características anticongelantes
- Menor tiempo de curado
- Menor calor de hidratación
- Baja permeabilidad

Que han llevado su amplio uso en reparaciones de emergencias, recuperaciones de autopistas, pistas de aterrizaje aceras, pisos, construcciones de rieles de alta velocidad, proyectos de conservación de agua y otros proyectos especiales.

2.5 Cenizas volantes

Para reducir la cantidad del producto cementante a utilizar se puede conseguir por medio del uso de “materiales alternativos” que tienen cabida como materia prima o materiales cementosos de reemplazo total o parcial, esta última es el caso de aplicación que se le da en este trabajo.

Los materiales alternativos se pueden clasificar como en sintéticos o naturales, pero una clasificación más adecuada involucra su composición química y por ende el tipo de producto de hidratación que forma, se puede decir que existen materiales puzolánicos e hidráulicos. La figura 2 presenta los campos de composición química aproximada de los materiales alternativos en un diagrama de composición SiO_2 -CaO- Al_2O_3 .²⁷

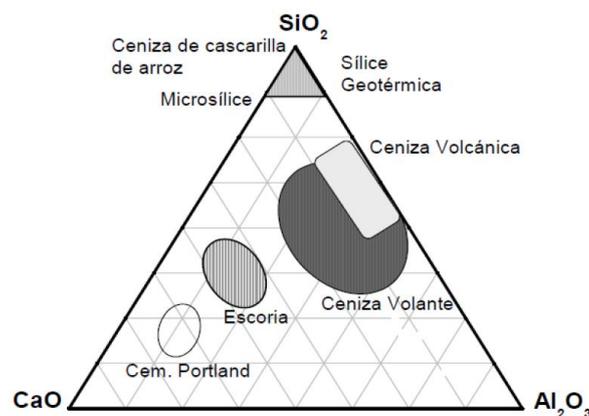


Figura 2. Diagrama ternario de fases SiO_2 -CaO- Al_2O_3 de algunos materiales alternativos.

Los materiales puzolánicos, que son los de interés en este trabajo, son una materia silíceo o alúmino-silíceos que finamente dividida no posee ninguna propiedad hidráulica, pero posee constituyentes (sílice-alúmina) capaces a temperatura ordinaria de fijar el hidróxido de cal para dar compuestos estables con propiedades hidráulicas, la reacción que describe tal proceso es llamada “reacción puzolánica”. La actividad puzolánica se refiere a la cantidad máxima de hidróxido de calcio con la que la puzolana puede combinar y la velocidad con la cual ocurre esta reacción.

Puzolana + cal + agua → silicatos y aluminatos de calcio hidratado

La actividad puzolánica depende: de la naturaleza y proporción de las fases activas presentes en la puzolana (composición mineralógica, de la relación cal-puzolana de la mezcla, de su finura (superficie específica) y de la temperatura de la reacción. Los productos de reacción puzolana/cal generalmente son del mismo tipo que los productos de hidratación del cemento portland: silicatos cálcicos hidratados (CSH), aluminatos cálcicos hidratados (CAH) y sílico-aluminatos cálcicos hidratados (CSAH).²⁷

Para determinar la actividad puzolánica de un material existen diferentes métodos tanto de carácter químico como mecánico, entre ellas el método químico o de Frattini (UNE EN 196-5).

Las puzolanas pueden clasificarse en:

Puzolanas naturales

- Materia de origen volcánico
- Materias sedimentarias de origen animal o vegetal

Puzolanas artificiales (producto de tratamiento térmico adecuado)

- Materias tratadas (tratamiento térmico 600 y 900 °C)
- Subproductos de fabricación industrial
- Cenizas volantes
- Humo de sílice
- Arcillas naturales (subproducto de la industria del ladrillo cocido)
- Ceniza de cascarilla de arroz
- Escorias granuladas de industrias metálicas no ferrosa

El tipo de puzolana artificial a tratar en este estudio son las cenizas volantes. La producción de energía eléctrica a partir de centrales termoeléctrica que emplean carbón como combustible, origina fundamentalmente dos tipos de residuos: las cenizas volantes y las cenizas de fondo o escorias, cuya principal diferencia es el tamaño de las partículas; las cenizas volantes constituyen típicamente el 80% del total de la ceniza, correspondiendo el 20% restante a las escorias, el total en peso de las cenizas volantes producidas en centrales térmicas es aproximadamente el 30% de la masa de carbón consumida.²⁸

De acuerdo con la norma UNE EN 450-1 la ceniza volante se define como un polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión de

carbón pulverizado con o sin materiales de cocombustión, que tienen propiedades puzolánicas y que están compuestos fundamentalmente por dióxido de silicio reactivo (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) y que:

- Se obtiene por precipitación electrostática o mecánica de partículas similares al polvo de los gases de combustión procedentes de centrales energéticas; y
- Se puede procesar por clasificación, selección, tamizado, secado, mezcla, molienda o reducción del carbono o mediante una combinación de estos procesos.

Conforme la norma UNE 83414-90 no se aplicará el término de ceniza volante al producto separado o condensado de flujos de gases procedentes de otros procesos industriales.

Según la Norma ASTM C618, existen principalmente dos tipos de cenizas volantes:

- Clase C, las cenizas volantes que se consideran en este grupo presentan propiedades cementíticas y puzolánicas, y en caso de utilizarse como cemento, el contenido en cal no puede sobrepasar el 20%.
- Clase F, son las cenizas volantes que tienen bajo contenido en cal y presentan propiedades puzolánicas.

La relación de los tipos C y F de cenizas con los rangos de carbón, no es siempre adecuada dado que las características geoquímicas del carbón no siempre van ligado al rango (antracita a hulla y subbituminoso a lignito). La tabla 4 muestra los componentes básicos de las cenizas volantes según el tipo de carbón del que proceden.

Tabla 4. Composición química de las cenizas volantes según el tipo del carbón del que proceden. Fuente: Vadillo et al., 1995

Componente	Bituminoso	Subbituminoso	Lignito
SiO_2	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3	5-35	20-30	10-25
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO_3	0-4	0-2	0-10
Na_2O	0-4	0-2	0-6
K_2O	0-3	0-4	0-4

Gran parte de estos óxidos componen fases cristalinas tabla 5, tales como la mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) que se encuentra principalmente incorporada en las esferas de vidrio, cuarzo (SiO_2) que presenta una forma irregular, magnetita (Fe_2O_2), que pueden ser fácilmente identificadas mediante difracción de Rayos-X.

Tabla 5. Composición mineralógica de las cenizas volantes, en % peso. Fuente: Fly Ash Resource Center, 2001

Fase	%
Vidrio aluminosilicatado	50-90
Mullita ($Al_6Si_2O_{13}$)	3-40
Cuarzo (SiO_2)	3-15
Magnetita (Fe_3O_4)	0,1-3,5
Hematita (Fe_2O_3)	<0,3-6
Cal libre (CaO)	<0,1-6
Anhidrita ($CaSO_4$)	0,2-1,5
Calcita ($CaCO_3$)	<0,3-0,6
Feldespatos	<0,1-3

2.5.1 Activación de cenizas volantes

La activación de las cenizas volantes se puede realizar por medio alcalino, este es un proceso químico que permite la transformación de la estructura vítrea que conforma la mayor parte de sus partículas, en compactos esqueletos cementantes. El principal aspecto a destacar sobre este genérico proceso químico es su diversidad cinética y su variabilidad de desarrollo micro estructural²⁹.

2.5.2 Propiedades físicas de las cenizas volantes

El tamaño normal normalmente oscila entre el 1-200 μm de diámetro, pero aproximadamente el 80% de las partículas suelen tener un diámetro menor de 60 μm . La superficie específica puede aumentar mediante molienda. La densidad aparente se estima entre 0,5-0,8 g/cm^3 , próxima a la del cemento que, en las mismas condiciones es de 1 g/cm^3 . El peso específico suele variar entre 1,9-2,8 g/cm^3 . Este parámetro tiene importancia porque, una trituración de las partículas aumentaría la superficie específica, por disminución del número de huecos, y en consecuencia aumentaría la densidad aparente. Debido a la fina división en la superficie de contacto, las cenizas volantes tienen gran capacidad para absorber productos líquidos, pero únicamente presentan propiedades hidráulicas aquellas cenizas que presentan un contenido en cal mayor o cercana al 40%, además de sílice y alúmina, normalmente procedentes de centrales térmicas que queman lignitos alcalinos. Así pues, la presencia de alúmina, sílice y óxidos de calcio en estado vítreo dan la actividad hidráulica para la formación del cemento.³⁰

CAPÍTULO III - MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

Los materiales usados para realizar las diferentes partes experimentales de este trabajo son los siguientes:

- Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA)
- Cenizas volantes
- Arena silíceo normalizada
- Agua destilada

3.1.1 Cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA)

El cemento utilizado es un cemento de producción industrial que está constituido a base de sulfoaluminatos de la Gama i.tech ALI suministrado por FYM HeidelbergCement Group; “i.tech ALI CEM GREEN” es un conglomerante compuesto por “i.tech ALI PRE GREEN” y anhídrita de alta calidad. Esta mezcla proporciona un desarrollo rápido de las resistencias iniciales y un aumento progresivo de las resistencias a medio y largo plazo, superando los valores alcanzados por los cementos Portland de altas prestaciones, combinado con un ciclo productivo de bajo impacto medioambiental.

Propiedades físicas y mecánicas

En la tabla 6 se muestran las propiedades físicas del CSA utilizado:

Tabla 6. Propiedades físicas del CSA utilizados en el ensayo. Fuente: Ficha técnica i.tech ALI CEM GREEN

Estabilidad dimensional	10
Superficie específica (Blaine)	5000 ± 500 cm ² /g
Tiempo inicial de fraguado*	≤ 25m

*en conformidad con la norma UNE EN 196-3 modificando la relación a/c = 0,33 ± 0,02

La resistencia a la compresión del CSA se muestra en la figura 3 de acuerdo con la norma UNE EN 196-1.

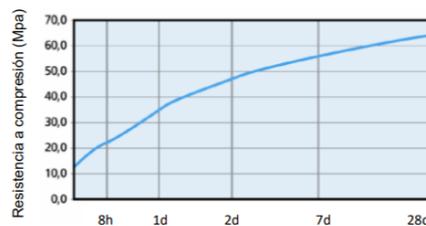


Figura 3. Resistencia a la compresión teórica del CSA utilizado. Fuente: Ficha técnica i.tech ALI CEM GREEN

Composición química

La composición de óxidos constituyentes principales de este cemento son los presentados en la tabla 7.

Tabla 7. Composición química tipo del CSA. Fuente: Patente Europea 2 602 154

Composición	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃
[%]	[40-70]	[2-40]	[5-40]	[0-15]	[5-25]

3.1.2 Cenizas volantes (CV)

Las cenizas volantes empleadas como material sustituyente en este estudio son procedentes de una central térmica que utiliza carbón lignito como combustible, el cual ha sido molido por 30 minutos y el 86% de tamaño de partícula es menor a $45\mu\text{m}$ ($<45\mu\text{m}$).

Composición química

Los constituyentes principales de las cenizas volantes de lignitos son los presentados en la tabla 8:

Tabla 8. Composición química de las cenizas volantes usadas. Fuente: Vadillo et al., 1995

Composición	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
[%]	15-45	10-25	4-15	15-40	3-10	0-10	0-6	0-4

3.1.3 Arena silícea normalizada

Para determinar la resistencia mecánica del cemento de acuerdo con la norma UNE EN 196-1, se utiliza arena normalizada CEN.

La arena de referencia CEN según DIN EN: 196-1 es una arena natural, silícea, de granos redondeados y cuyo contenido en sílice es al menos del 98% y se destaca sobre todo por su distribución granulométrica, los tamaños de grano se encuentran en el rango de entre 0,08 y 2,00 milímetros mostrados en la tabla 9 y su grado de humedad de la arena es del 0,2%.

Tabla 9. Distribución granulométrica de la arena de referencia CEN

Tamiz (mm)	% acumulado
2,00	0
1,60	7 ± 5
1,00	33 ± 5
0,50	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 1

3.1.4 Agua

Para los ensayos se utilizará agua destilada o desionizada a temperatura de 20 °C.

3.2 Métodos

Estos procedimientos se han llevado a cabo mediante dos campañas experimentales: la primera en pasta donde se analizan la formación de fases mediante difracción de rayos X, este permitirá seleccionar las composiciones adecuadas para los demás ensayos y los tiempos de fraguado por la aguja de Vicat, ambas con una relación $a/c= 0,40$; la segunda campaña experimental en morteros, donde se miden las

variaciones volumétricas y las resistencias mecánicas, estas con una relación $a/c= 0,50$ basadas en la normativa UNE EN 196-1.

3.2.1 Campaña en pastas

3.2.1.1 Amasado de las pastas

Las variaciones de las especies y las velocidades de hidratación del CSA en función del contenido de ceniza volante (CV) se analizan atendiendo a las composiciones iniciales que se muestran en la tabla 10 con una relación $a/c= 0,40$; a partir de los datos e hidratación a edades tempranas de 7 y 28 días se escogerán las composiciones para la preparación de los morteros.

Tabla 10. Composiciones de CSA/CV para ser analizadas.

Denominación	CSA	CV
CSA 10	100	0
CSA 09	90	10
CSA 08	80	20
CSA 07	70	30
CSA 06	60	40
CSA 05	50	50
CSA 04	40	60
CSA 03	30	70
CSA 02	20	80
CSA 01	10	90

Las condiciones de curado de las muestras quedaran almacenadas en cámara húmeda con una temperatura de 25 °C y humedad de 99%.

Procedimiento:

- Dimensiones del molde: (2x2x2) cm.
- Pesado de las muestras (CSA, CV y agua).
- Homogeneización del cementante y la puzolana (CSA y CV).
- Agregar el agua y proceder de inmediato al mezclado.
- Mezclar durante aproximadamente 1 minuto.
- Engrasar el molde con aceite que no reaccione con la mezcla para facilitar el desmoldado.
- Verter mezcla en molde.
- Curar por 24 horas.
- Desmoldar.
- Curar durante: 7, 28 y 90d.

3.2.1.2 Desmoldado de las muestras

24 horas del moldeado de las pastas, se desmoldan las muestras y se dejan en curado por 7 y 28 días en el mismo contenedor con la disolución reguladora hasta la preparación de las muestras para ensayo de DRX.

3.2.1.3 Caracterización por Difracción de Rayos X

La mineralogía y formación de fases hidratadas de las distintas composiciones cemento/cenizas volantes en las pastas fue estudiada por medio a la Difracción de Rayos X. El Difractómetro de Rayos X empleado fue PANalytical X'Pert PRO MPD difractómetro (modelo DY 3197) que utilizan radiaciones $\text{CuK}\alpha$. Las muestras se examinaron con una potencia de 30 Kv y 10 mA, en el rango 2θ comprendido entre 5° - 60° con pasos de $0,01^\circ$ y tiempo por pasos de 0,5 segundos.

Preparación de las muestras para ensayo DRX

El proceso de hidratación en sus tiempos respectivos de 7 y 28 días se detuvo mediante “congelación” al agregar acetona y alcohol para secar las muestras una vez trituradas.

Equipos e instrumentos utilizados:

- Espátula para corte
- Martillo
- Mortero de ágata
- Kitasato
- Cono de goma
- Embudo Büchner
- Papel filtro cualitativo $\varnothing 150\text{mm}$
- Bomba de vacío

Materiales:

- 5g aproximado de las pastas curada a los 7, 28 y/o 90 días
- acetona
- etanol

Preparación de las muestras:

- Cortar aproximadamente 5g de las pastas, reservar en curado la otra parte para ensayo a los 28 días.
- Triturar las muestras hasta tener un polvo muy fino y uniforme.
- Verter en embudo Büchner que contiene el papel filtro $\varnothing 150\text{mm}$ y remojar durante 45 segundos en acetona antes del secado al vacío.
- Transcurrido los 45 segundos iniciar el secado al vacío e inmediatamente lavar con etanol.
- Dejar que las muestras sequen completamente.
- Tamizar por tamiz $\varnothing 63\mu\text{g}$ hasta completar 1g aproximado de muestra para ensayo DRX; de ser necesario triturar hasta obtener partículas $\geq \varnothing 63\mu\text{g}$.
- Reservar en ambiente hermético para evitar la carbonatación.

Para los resultados a los 28 y 90 días se realiza el mismo procedimiento de preparación de muestras descritos anteriormente con la pasta reservada.

3.2.1.3 Tiempos de fraguado

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. Dentro del

proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar, tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable, este estado se denomina fraguado final.³¹

Los tiempos de fraguado indican si la pasta está desarrollando sus reacciones de hidratación de manera normal. El yeso incluido dentro del cemento regula el tiempo de fraguado, pero también influye la finura del cemento, la relación agua/cemento y los aditivos usados.

Procedimiento para los tiempos de fraguado

El tiempo de fraguado inicial y final se realiza mediante la norma UNE-EN 196-3 en el que utiliza un Aparato de Vicat, este posee una aguja de acero de forma cilíndrica recta con una longitud efectiva de 45mm y un diámetro de 1,13mm. La masa total de las partes móviles debe ser 300g. Su movimiento debe ser exactamente vertical y sin rozamiento apreciable y sus ejes deben coincidir con el de la aguja.

El procedimiento consiste en llenar el molde de Vicat con la consistencia normal de amasada, se introduce el molde lleno y la placa de base un contenedor, se añade agua de manera que la superficie de la pasta esta sumergida al menos 5mm y se almacena en la cámara con temperatura controlada. En el momento de la medición, el molde y la placa se llevan al aparato de Vicat y se sitúa debajo de la aguja, se baja la aguja despacio hasta que entre en contacto con la pasta se espera entre 1 y 2 segundos para evitar una velocidad inicial o aceleración forzada de las partes móviles. Se sueltan rápidamente las partes móviles y la aguja debe penetrar verticalmente en la pasta. Se lee la escala cuando haya terminado la penetración, o 30s después de la liberación de la aguja, lo que ocurra primero. Se limpia la aguja Vicat inmediatamente después de cada penetración, se conserva la probeta para el ensayo del fraguado final. Para determinar el tiempo final de fraguado, se invierte el molde lleno utilizado anteriormente y se repite todo el procedimiento anterior.

La dosificación para este estudio está descrita en la tabla 11 que de acuerdo esta normativa se utiliza 500g de cemento y a partir aquí se determina la cantidad de agua; en este ensayo se ha utilizado la misma relación a/c=0,40 de amasado de pasta de la prueba para caracterización mineralógica por DRX, por lo que resulta una cantidad de 200g de agua.

Tabla 11. Dosificación para ensayo de tiempos de inicio y final de fraguado.

Dosificación UNE EN 196-3	
cemento (g) =	500
a/c =	0,4
agua (g) =	200

Los porcentajes de sustitución del cemento por las cenizas volantes para este ensayo son las mostradas en la tabla 12.

Tabla 12. Composiciones y pesos para utilizar en el ensayo de tiempos de fraguado. Fuente: edición propia.

Designación	CSA		CV	
	%	g	%	g
CSA 10	100%	500	0%	0
CSA 07	70%	350	30%	150
CSA 05	50%	250	50%	250
CSA 03	30%	150	70%	350

En la figura 4 se presenta el aparato de Vicat, otros instrumentos utilizados y muestra durante el proceso de realización del ensayo, además de las pastas con las distintas proporciones de sustitución del CSA por CV luego de terminado el ensayo.



Figura 4. Ensayo de fraguado inicial y final durante y después de su realización. Fuente: toma propia en laboratorio de la UPC

El fraguado empieza desde el contacto del agua con el cemento que es cuando inician los procesos de hidratación del cemento; las condiciones de temperatura y humedad entre mediciones para este ensayo son las del laboratorio.

3.2.2 Campaña en morteros

3.2.2.1 Dosificación y preparación de muestras

La fabricación de morteros se realiza mediante la normativa UNE 196-1 siguiendo la dosificación estándar de 1:3 (cemento: arena, en peso) con una relación a/c total de 0,5, los diseños de mezclas se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Dosificación estándar para los morteros. Fuente: UNE EN 196-1

Dosificación 1:3. UNE EN 196-1	
Peso cemento =	450g
Peso agua =	225g
Peso arena =	1350g
a/c =	0,50

Los porcentajes de sustitución del cemento por las cenizas volantes en las composiciones son los mostrados en la tabla 14:

Tabla 14. Composiciones y pesos para utilizar en los morteros. Fuente: edición propia.

Designación	CSA		CV	
	%	g	%	g
CSA 10	100%	450	0%	0
CSA 07	70%	315	30%	135
CSA 05	50%	225	50%	225
CSA 03	30%	135	70%	315

3.2.2.2 Resistencias mecánicas

La resistencia de los morteros se realiza siguiendo la norma UNE EN 196-1 que describe el método para determinar de las resistencias mecánicas a compresión y a flexión de morteros de cemento; para lo cual se fabrican probetas prismáticas (40mm x 40mm x160mm) que se conservan en cámara húmeda cubriendo la superficie con un plástico durante 24 horas, pasado este tiempo se desmoldan para curar las probetas por 28 días de su fabricación y determinar su resistencia a flexión y compresión.

- Ensayo de flexión

Se utiliza el método de carga de los tres puntos con el equipo para medir la resistencia a la flexión. Se coloca el prisma en la máquina de ensayo, con una cara lateral sobre los rodillos soporte y con su eje longitudinal normal a los soportes. Se aplica la carga verticalmente mediante los rodillos de carga sobre la cara lateral opuesta del prisma y se incrementa uniformemente a una velocidad de (50 ± 10) N/s hasta la rotura.

Se mantienen las mitades del prisma cubierta con un paño húmedo hasta el ensayo de compresión.

- Ensayo de compresión

Se ensaya cada semiprisma cargando sus caras laterales con ayuda del equipo especificado.

Se centra cada semiprisma lateralmente con relación a los platos de la maquina $\pm 0,5$ mm y longitudinalmente de forma que la base del prisma no sobresalga de los platos o placas auxiliares más de unos 10mm.

Se aumenta la carga uniformemente a una velocidad de (2.400 ± 10) N/s durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura.

En la figura 5 se muestran morteros de las designaciones seleccionadas durante el proceso de curado para los ensayos de resistencias mecánicas.



Figura 5. Morteros fabricados durante el curado con las designaciones de CSA/CV seleccionadas.

3.2.2.3 Variación volumétrica (Retracción/Contracción)

El ensayo de expansión volumétrica fue realizado siguiendo la normativa UNE EN 80113 en el que establece el procedimiento operatorio consistente en que transcurridas las $24h \pm 30min$ desde el momento del llenado del molde, se sacan las probetas y se mide la longitud de cada probeta entre los extremos exteriores de las piezas cilíndricas de referencia con el comparador.

Las edades establecidas para la toma de datos son las presentadas en la tabla 15, desde L0-L4 corresponden a las lecturas en las primeras edades inmediatamente desde el desmoldado de las probetas, las de L5-L11 son las correspondientes a edades más avanzadas que van desde las 24 horas hasta los 28 días desde la primera toma L0. Las condiciones de humedad y temperatura entre mediciones son las que se encuentran en la cámara de humedad.

Tabla 15. Edades establecidas para la toma de longitudes, que abarcan desde las primeras edades del desmoldado hasta edades más avanzadas de 28 días.

L en mm	Edades
L0	Lectura/long inicial. 24h luego de fabricación
L1	15 minutos después de L0
L2	30 minutos después de L0
L3	1 hora después de L0
L4	2 horas después de L0
L5	24 horas después de L0
L6	48 horas después de L0
L7	5 días después de L0
L8	6 días después de L0
L9	7 días después de L0
L10	14 días después de L0
L11	28 días después de L0

CAPÍTULO IV - RESULTADOS

RESULTADOS

4.1 Campaña en pastas

4.1.1 Difracción de Rayos X (DRX)

4.1.1.1 Caracterización microestructural de las materias primas

Cemento de sulfoaluminato de calcio

En la figura 6 se muestra el difractograma obtenido por DRX del cemento de sulfoaluminato de calcio. Los constituyentes mineralógicos detectados, fueron mayoritariamente Y- Yelemita ($C_4A_3\bar{S}$), A- Anhidrita ($CaSO_4$) y (-) silicato bicálcico o belita (C_2S).

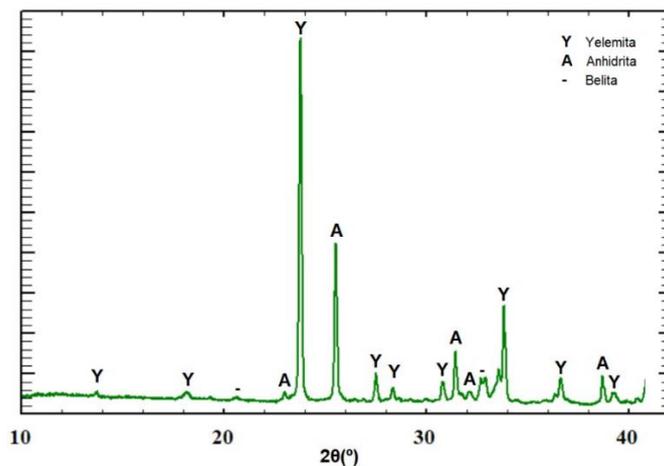


Figura 6. DRX del cemento de sulfoaluminato de calcio (Y-Yelemita, A-Anhidrita y - belita)

Cenizas volantes

La ceniza fundamentalmente es un material vítreo (halo registrado entre $2\theta = 20-35^\circ$) como puede verse en el difractograma de la figura 7, pero está constituida también por una serie de fases cristalinas minoritarias como la M- mullita, Mt-magnetita, Q- cuarzo, y H- hematita.

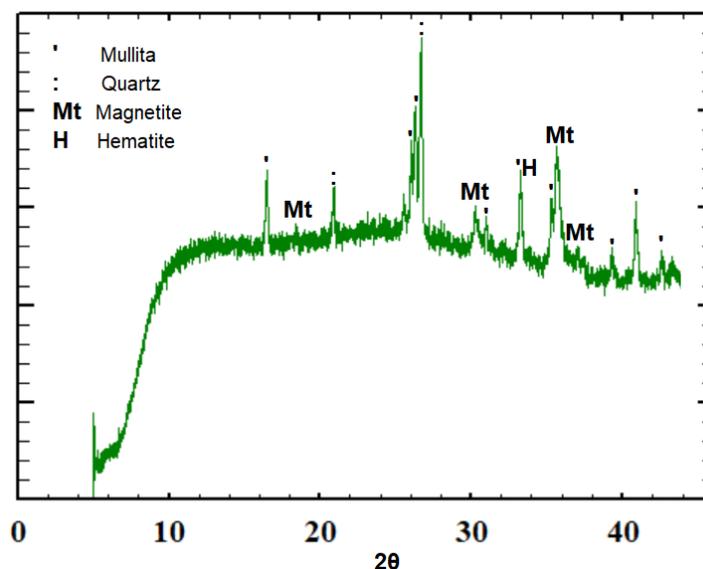


Figura 7. DRX de la ceniza volante (M-mullita, Mt-magnetita, Q-cuarzo y H-hematita).

En pastas

4.1.1.2 Caracterización microestructural de las pastas

A medida que el contenido de cenizas volantes en la pasta era mayor el proceso de trituración era más fácil, pero el tiempo de secado aumentaba en la misma proporción, incluso la composición con mayor contenido de cenizas, es decir, del 90% tenía apariencia de aún estar húmeda a los 7 días de curado. Esto podría confirmar que los materiales puzolánicos no endurecen por sí mismo cuando se amasan con el agua.⁶

A continuación, se exponen los resultados encontrados del ensayo DRX.

En la figura 8 se muestra el difractograma de la denominación CSA10 después de la hidratación, la cual está constituida por el 100% de CSA, se pueden observar que para todos los tiempos de hidratación estudiados (7, 28 y 90 días), la formación de fases hidratadas fueron las mismas, en su mayoría etringita, también presentó picos de belita (en $2\theta = 32,63^\circ$) y el pico más alto de yelemite ($2\theta = 23,70^\circ$) que estuvo presente en su fase anhidra, estas al tener tiempo de hidratación más lentos iban disminuyendo a medida que aumentaba el tiempo de curado.

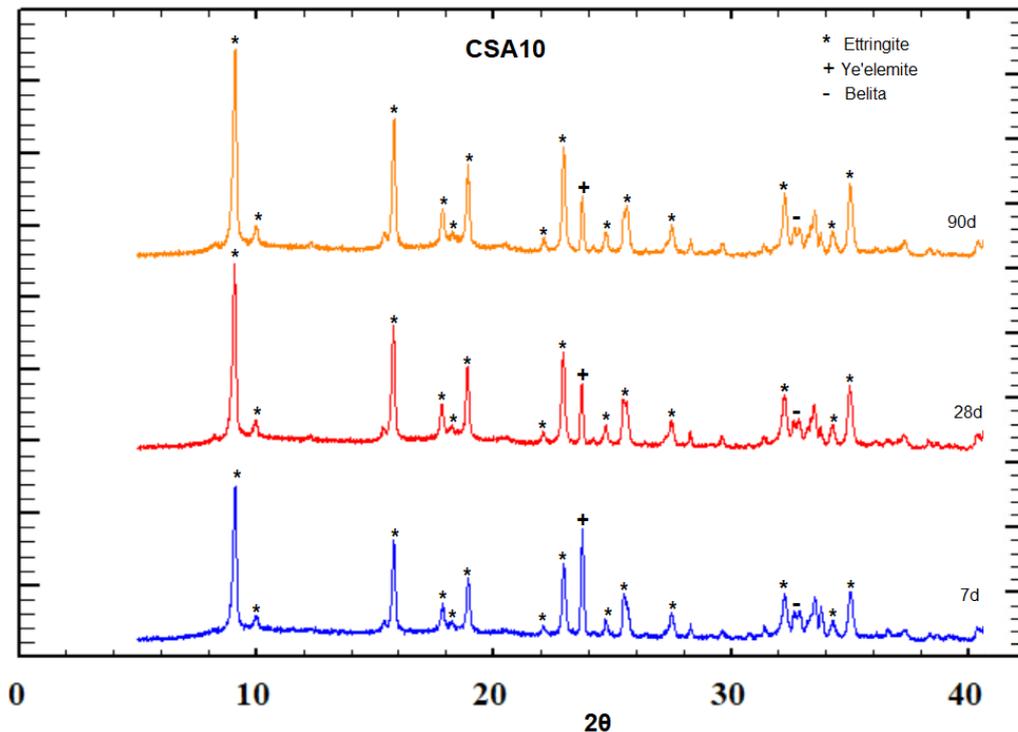


Figura 8. DRX CSA10. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.

El difractograma de la figura 9 corresponde a la denominación CSA09 en su composición posee un 10% de cenizas volantes, al igual que el caso anterior se puede observar el mismo comportamiento en relación con formación de fases, no se hacen perceptible las fases relacionadas a las cenizas y la yelemite ha disminuido respecto a la anterior.

RESULTADOS

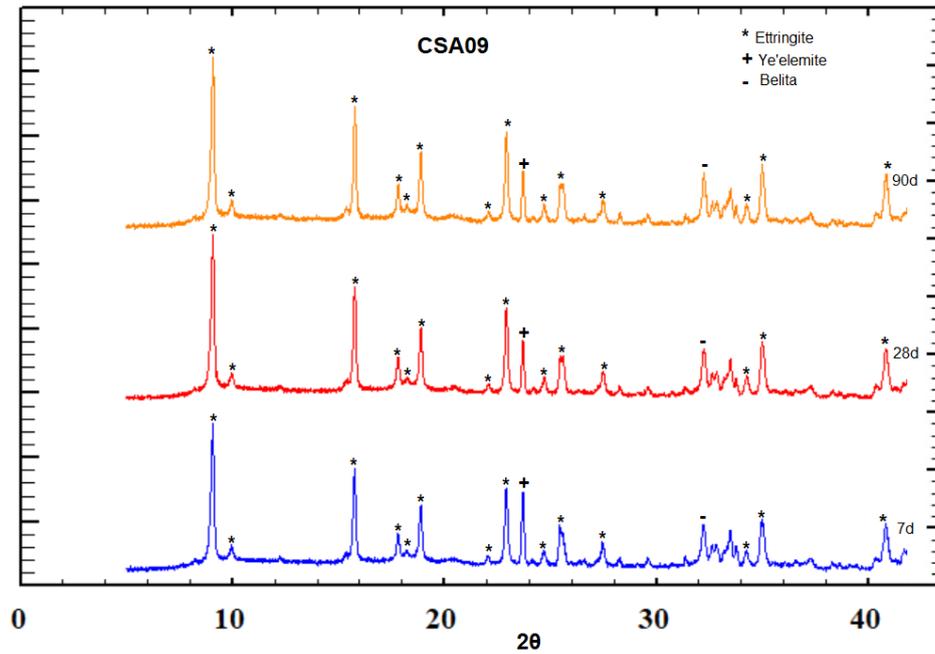


Figura 9. DRX CSA09. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.

En las figuras 10 se presenta el difractograma de la denominación CSA08, la cual presenta el mismo comportamiento que en caso anterior CSA09.

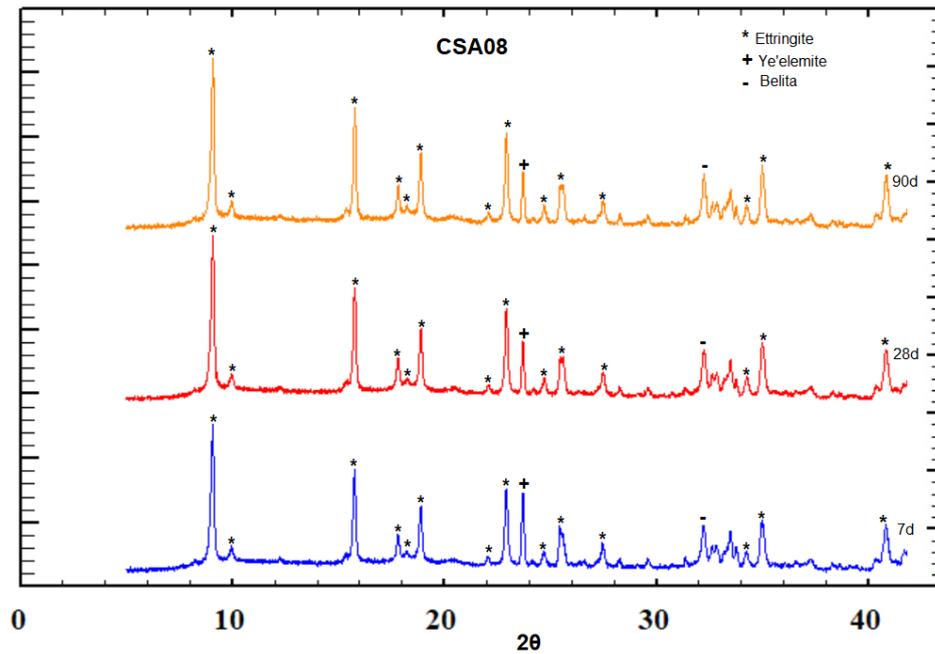


Figura 10. DRX CSA08. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.

El difractograma de la figura 11 corresponde a la denominación CSA07, este presenta el mismo comportamiento anteriormente mencionado, pero inician a identificarse picos de mullita y cuarzo por la presencia de las cenizas volantes.

RESULTADOS

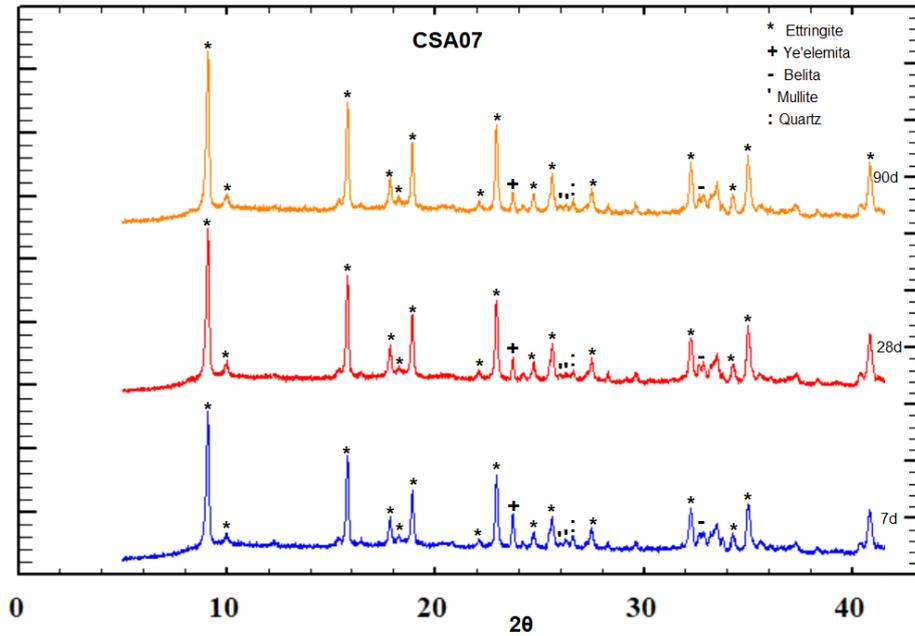


Figura 11. DRX CSA07. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.

El difractograma de la figura 12 está relacionado a la designación de CSA06, aunque presenta el mismo comportamiento que en los casos anteriores, respecto a las fases hidratadas del cemento, es importante destacar la disminución de ciertas posiciones 2θ de etringita, belita y la yelemita.

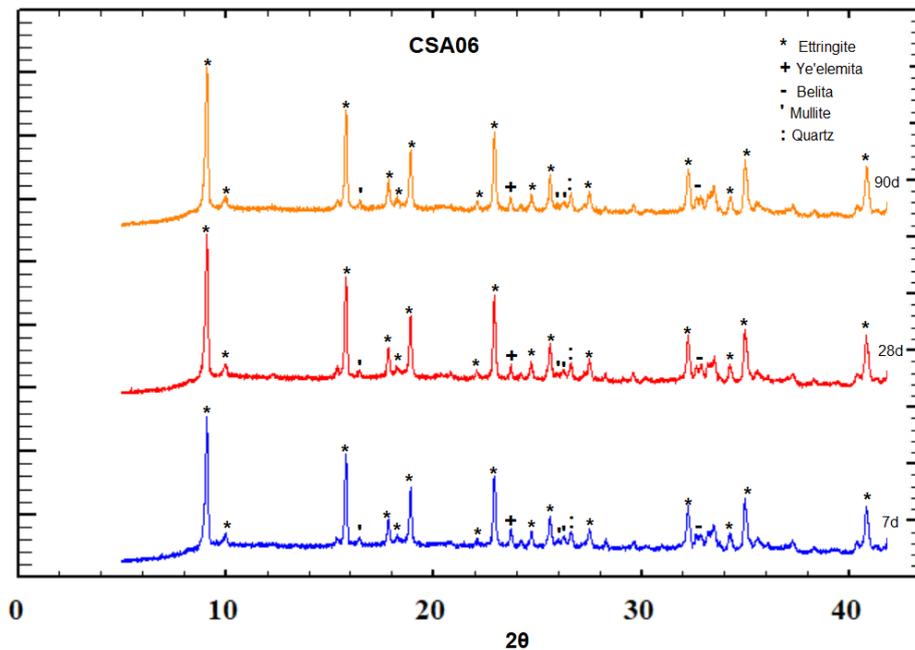


Figura 12. DRX CSA06. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.

El difractograma de la figura 13 corresponde a la denominación CSA05 en el que se puede percibir una disminución significativa de las intensidades de las fases hidratadas del cemento y aumento correspondientes a las de la ceniza.

RESULTADOS

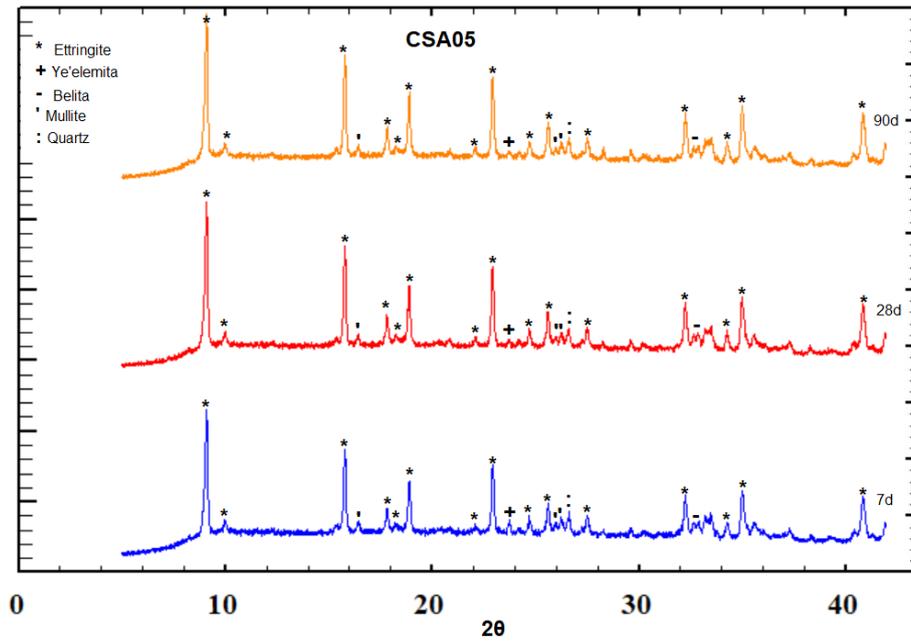


Figura 13. DRX CSA05. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.

Para el difractograma del CSA 04 figura 14 ya no se identifica el pico de la Yelemita de la posición $2\theta = 23, 78^\circ$ por la disminución de la cantidad de cemento en la pasta.

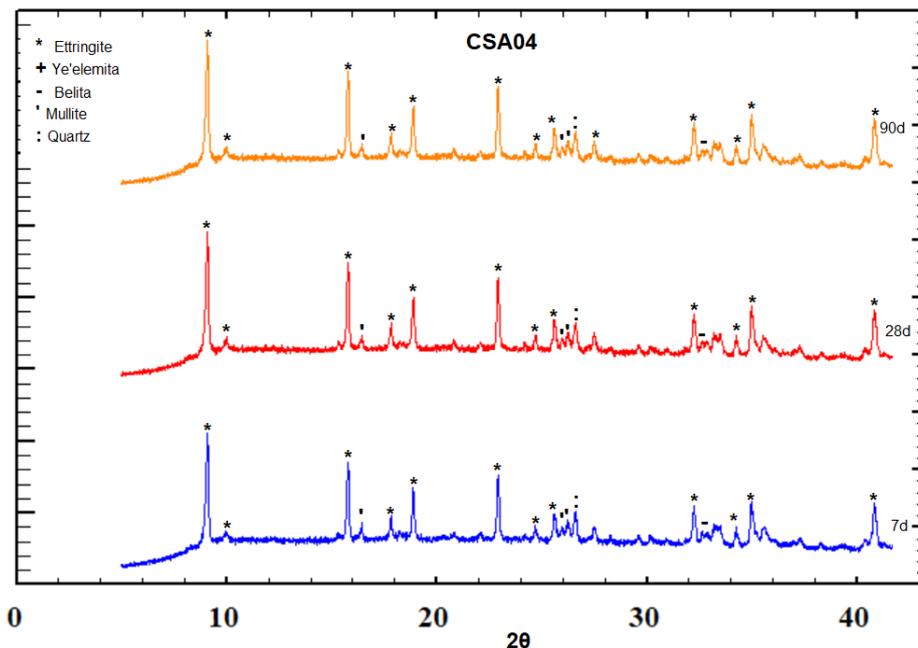


Figura 14. DRX CSA04. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.

Para el caso de la figura 15 CSA03 se puede visualizar un nuevo pico de mullita de las cenizas ubicado en la posición $2\theta=16,49^\circ$.

RESULTADOS

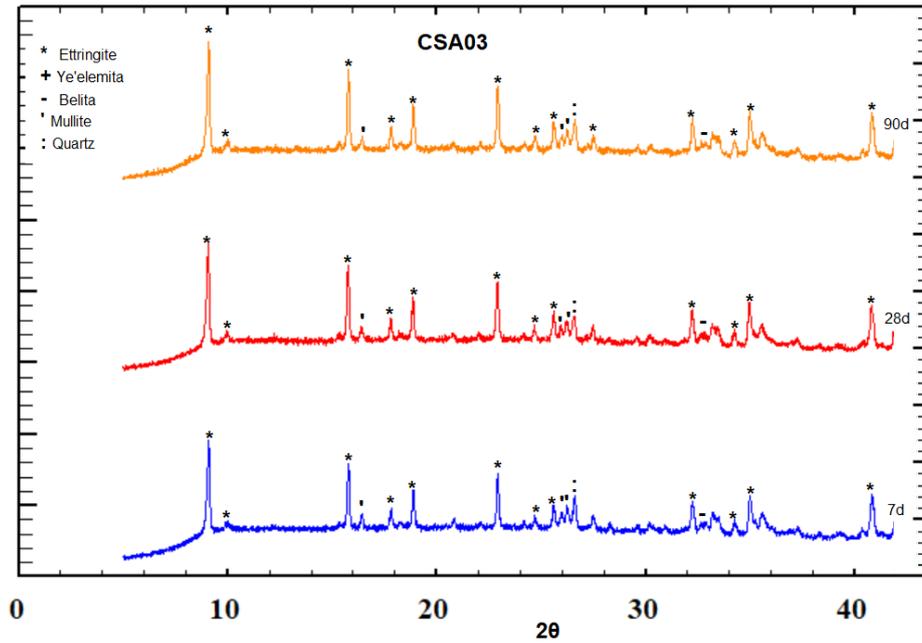


Figura 15. DRX CSA03. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.

Para el caso del difractograma CSA02, figura 16 se puede notar el aumento de las intensidades de las cenizas volantes y disminución de las correspondiente a las del CSA.

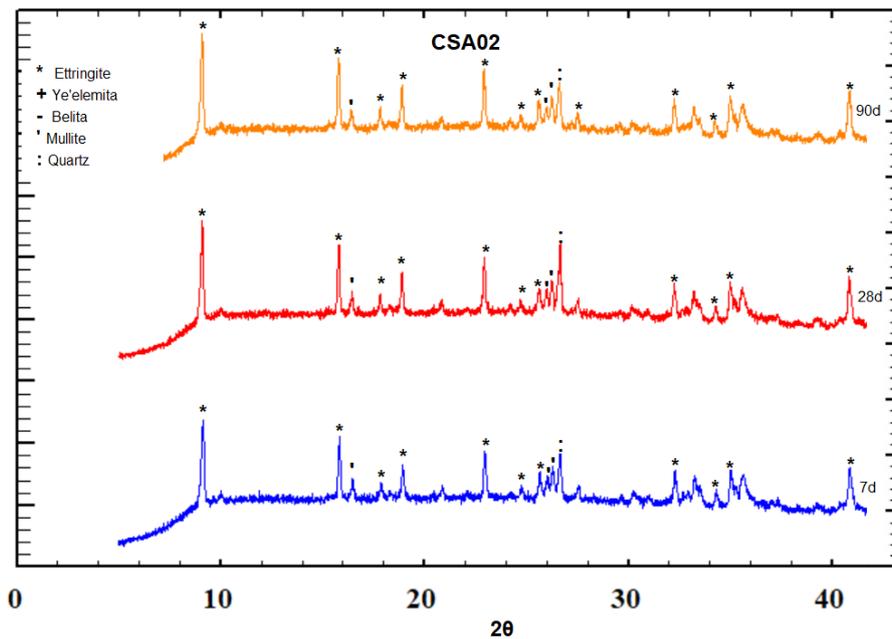


Figura 16. DRX CSA02. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.

La presencia de las fases vítreas de las cenizas es muy notoria en el difractograma de la figura 17, además de la disminución de las fases del cemento.

RESULTADOS

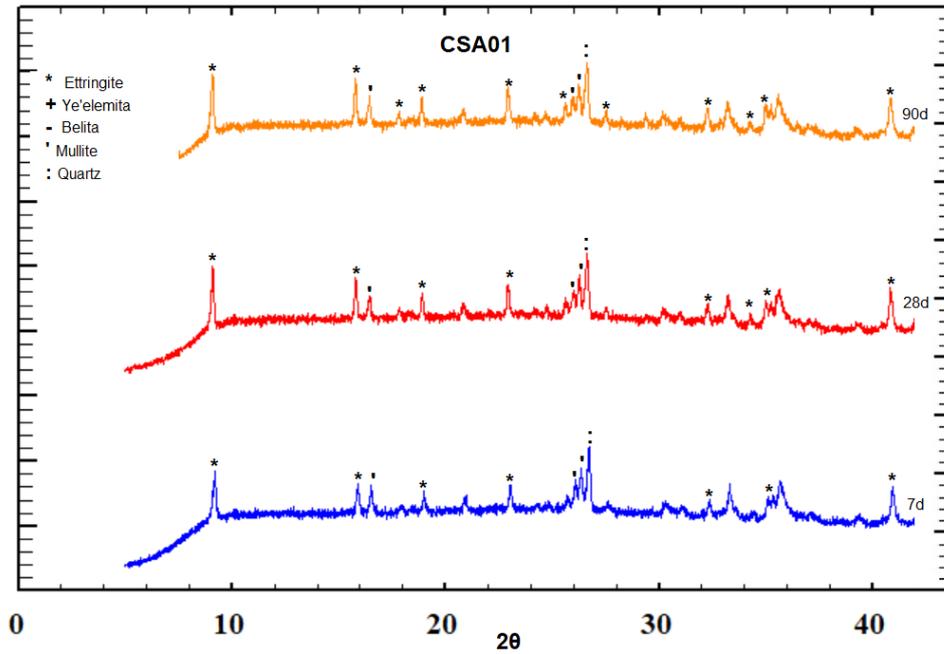


Figura 17. DRX CSA01. A los 7d - color azul, 28d - color rojo y 90d - color naranja.

4.1.1.3 Resumen del comportamiento de la hidratación de las distintas proporciones

En este apartado, se muestra el resumen gráfico de los picos que han destacado cambios apreciables en los difractogramas, tanto en el proceso de hidratación de los materiales CSA-CV, como su comportamiento en las distintas proporciones y edades. Los datos para la elaboración de las gráficas se encuentran en el anexo I.

En la figura 18 se muestra el difractograma de la etringita (fase hidratada del cemento), ubicada en la posición $2\theta = 9,10^\circ$, de la cual se puede decir que aumenta de intensidad a medida que aumenta el tiempo de curado; entre composiciones, aumenta sus intensidades hasta la composición CSA07 en las edades de 7 y 28d, luego disminuye de manera considerable; para el caso de los 90 días, la intensidad disminuye en todas las composiciones. Este comportamiento se manifiesta en todas las posiciones de etringita identificadas.

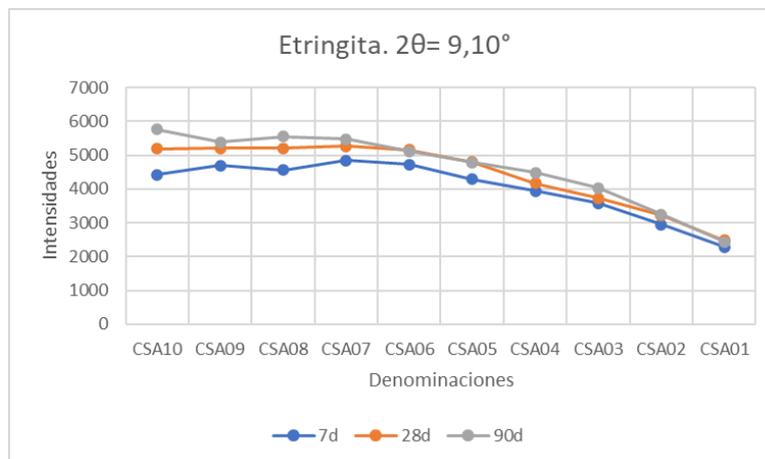


Figura 18. Comportamiento del difractograma de la posición $2\theta = 9,10^\circ$ (etringita), fase hidratada del CSA. Fuente: edición propia

RESULTADOS

El pico más notorio de yelemita ubicado en la posición $2\theta = 23,70^\circ$ de la fase anhidra del cemento figura 6, se mantuvo en la fase hidratada en todas las composiciones, disminuyendo de intensidad a medida que aumentaba el tiempo de curado de 7 a 28 días, a partir de este tiempo (hasta los 90 días) mantuvo sus intensidades en todas las composiciones, este comportamiento se puede visualizar en la figura 19. Para el tiempo de curado de 7d, las intensidades disminuían a medida que se aumentaba la proporción de CV a la mezcla.

De este análisis se puede concluir, que esta fase tardó mayor tiempo para hidratarse.

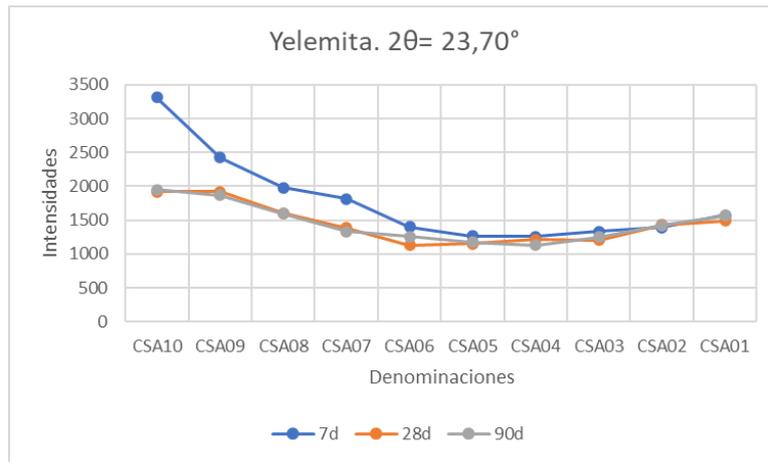


Figura 19. Comportamiento del diafractograma de la posición $2\theta = 23,70^\circ$ (Yelemita), fase anhidra del CSA. Fuente: edición propia

En todas las fases cristalinas de la CV, identificadas en los diafractogramas en su fase anhidra y luego de la hidratación del cemento, se puede establecer que aumentaron de intensidades en la proporción que se les añadía CV a las mezclas, ejemplo: mullita (posición $2\theta = 26,70^\circ$) figura 20.

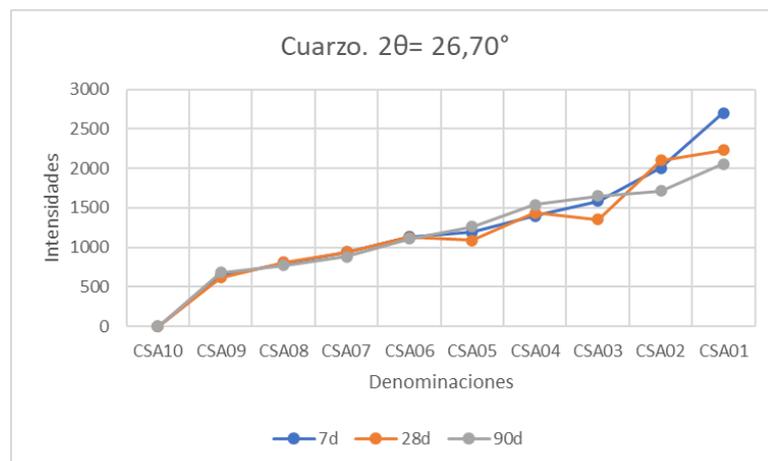


Figura 20. Comportamiento del diafractograma de la posición $2\theta = 26,70^\circ$ (cuarzo). Fase anhidra de la CV. Fuente: edición propia.

RESULTADOS

4.1.1.4 Conclusiones del ensayo DRX

Las fases hidratadas del CSA en su mayoría corresponde a la etringita. El pico de Yelemita (posición $2\theta = 23,78^\circ$) en las pastas permaneció igual que en su condición anhidra hasta las denominaciones CSA05.

El comportamiento de aparición de las fases fue similar para tiempos de hidratación de 7, 28, 90 días.

En las fases hidratadas, se detectan las mismas fases cristalinas de las cenizas que en su fase anhidra; se podría con esto establecer que no se descarta del todo que la activación de las CV no haya ocurrido por las reacciones de hidratación del cemento y que es posible que se identifiquen por otro método.

A medida que aumentaba el porcentaje de sustitución de CSA por CV, disminuía la intensidad de las fases hidratadas del CSA.

4.1.1.5 Justificación de selección de composiciones para otros ensayos

La selección de las designaciones de CSA/CV están basados en los resultados obtenidos en el ensayo DRX de la composición mineralógica de las pastas estudiadas anteriormente, cuya justificación consiste en: **CSA10** - composición de referencia, **CSA07** - intensidades similares a composición de referencia con muy bajas intensidades de fases de las cenizas, **CSA05** – composición intermedia con mayor intensidad en fases de cenizas y **CSA03** - disminución de todas las intensidades y fase yelemita de la posición $2\theta = 23,78^\circ$ no presente.

4.1.2 Tiempos de fraguado inicial y final

En la tabla 16, se presenta los resultados del ensayo de los tiempos de fraguado de la composición CSA10, este tiene unos tiempos de principio de fraguado de 20 minutos y final de fraguado de 24 minutos.

Tabla 16. Tiempo de fraguado inicial y final de la denominación CSA10. Fuente: edición propia, ensayo realizado en la UPC

CSA10	
Inicio de fraguado	
Tiempo 0 = 5min	
Penetración (mm)	t transcurrido (min)
41.00	0
31.00	5
20.00	10
5.00	15
Principio de fraguado desde tiempo 0	20
Final de fraguado	
1.00	15
0.50	19
Final de fraguado desde tiempo 0	24

RESULTADOS

En la tabla 17, se presenta los resultados del ensayo para la denominación de CSA07 el cual su tiempo de fraguado inicial ocurrió a los 21 minutos desde el tiempo cero y el final a los 34 minutos.

Tabla 17. Tiempo de fraguado inicial y final de la denominación CSA07. Fuente: edición propia, ensayo realizado en la UPC

CSA07	
Inicio de fraguado	
Tiempo 0 = 6min	
Penetración (mm)	t transcurrido (min)
41.00	0
39.00	5
28.50	10
6.00	15
Principio de fraguado desde tiempo 0 =	21
Final de fraguado	
3.00	17
2.00	21
1.50	23
1.00	25
0.50	28
Final de fraguado desde tiempo 0 =	34

Los tiempos de fraguado de la denominación CSA05 se muestran en la tabla 18 su tiempo de fraguado inicial ocurrió a los 26 minutos desde el tiempo cero y el final a los 32 minutos.

Tabla 18. Tiempo de fraguado inicial y final de la denominación CSA05. Fuente: edición propia, ensayo realizado en la UPC

CSA05	
Inicio de fraguado	
Tiempo 0 = 6min	
Penetración (mm)	t transcurrido (min)
41.00	0
41.00	5
16.00	10
7.50	15
2.00	20
Principio de fraguado desde tiempo 0 =	26
Final de fraguado	
Penetración (mm)	t transcurrido (min)
1.50	21
1.00	23
1.00	24
0.50	26
Final de fraguado desde tiempo 0 =	32

RESULTADOS

El principio de fragua de la denominación CSA03 corresponde a los 26 minutos y el final a los 31 minutos como se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Tiempo de fraguado inicial y final de la denominación CSA03. Fuente: edición propia, ensayo realizado en la UPC

CSA03	
Inicio de fraguado	
Tiempo 0 = 6min	
Penetración (mm)	t transcurrido (min)
41.00	0
41.00	5
36.00	10
12.50	15
2.50	20
Principio de fraguado desde tiempo 0 =	26
Final de fraguado	
Penetración (mm)	t transcurrido (min)
1.00	21
1.00	23
0.50	25
Final de fraguado desde tiempo 0 =	31

El resumen comparativo de los resultados de los tiempos de fraguado se muestra en la figura 18, en el que se puede destacar que, a medida que se le aumenta el porcentaje de sustitución de cenizas volantes en las composiciones, aumentas sus tiempos pasando de unos 24 a 34 minutos atendiendo a su composición.

Estos resultados pueden tener cierto interés industrial de cara a la trabajabilidad de los materiales; por lo general se trata el CSA de un cemento con tiempos de fraguado bastante cortos.

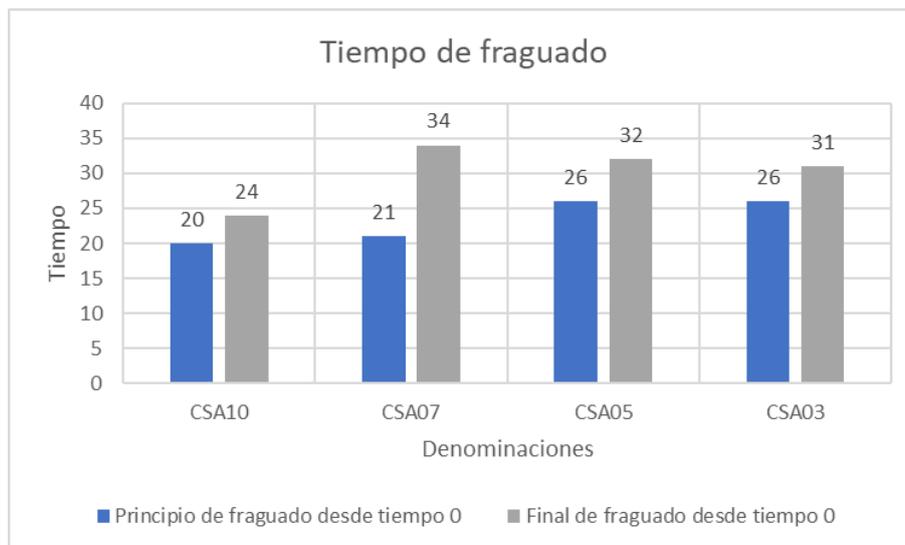


Figura 21. Tiempos de fraguado de las composiciones analizadas. Fuente: edición propia

4.2 Campaña en morteros

4.2.1 Ensayo de expansión volumétrica: comportamientos de la retracción/contracción

Una vez realizadas la toma de longitud nominal de las probetas (anejo II), para obtener los resultados se utiliza la siguiente ecuación, que indica el comportamiento de la expansión volumétrica, es decir, si entre la medición inicial y la realizada en el tiempo correspondiente hubo expansión o contracción, expresados en porcentajes.

$$\Delta L_n = \frac{L_n - L_0}{25,4} \times 100$$

Donde:

ΔL_n , variación volumétrica (%)

L_n , longitud en tiempo t (mm)

L_0 , longitud inicial de probeta al momento del desmoldado (mm)

25,4, longitud nominal de galga del comparador analógico en mm

La tabla 20 muestra los resultados de las variaciones volumétricas de las probetas con designación CSA10, las contracciones están representados por el color rojo y signo negativo y las expansiones por el color negro y signo positivo; de los resultados se puede establecer que en las primeras edades estas probetas sufrieron contracciones, a partir de las 24h tuvieron aumento de volumen expansión) que continuó hasta los 48h y después de estas edades la variación se mantuvo parcialmente estable hasta la edad de 28 días en que tuvieron nuevamente contracciones, pero no tan altas que llegaran a las de las edades iniciales, estos resultados se pueden visualizar en la figura 19.

Tabla 20. Resultado de la variación volumétrica para CSA 10. Fuente: edición propia, toma de datos realizados en la UPC

Serie/ ΔL (mm)	CSA 10-01	CSA 10-02	CSA 10-03
$\Delta L1$	-0.024%	-0.083%	-0.094%
$\Delta L2$	-0.043%	-0.114%	-0.118%
$\Delta L3$	0.020%	-0.091%	-0.083%
$\Delta L4$	-0.039%	-0.091%	-0.067%
$\Delta L5$	0.197%	0.122%	0.126%
$\Delta L6$	0.260%	0.165%	0.169%
$\Delta L7$	0.142%	0.260%	0.248%
$\Delta L8$	0.146%	0.248%	0.264%
$\Delta L9$	0.185%	0.295%	0.236%
$\Delta L10$	0.075%	0.177%	0.173%
$\Delta L11$	0.209%	0.335%	0.343%

RESULTADOS

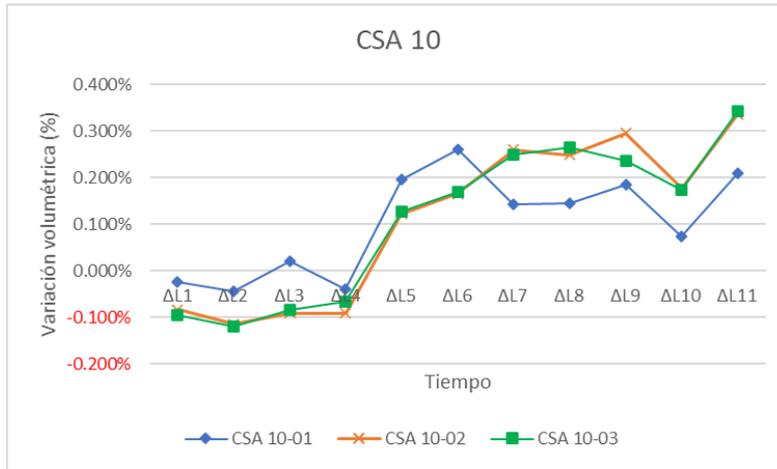


Figura 22. Representación de las variaciones volumétricas de la designación CSA10. Fuente edición propia

Tal y como puede verse en la figura 20, la repetitividad de los resultados para las muestras CSA10 es buena, ya que presenta una desviación estándar de 0,41 entre mediciones.

Los resultados de las variaciones volumétricas de las designaciones CSA07 y CSA05 se muestran en las tablas 21 y 22, de los que se puede establecer que, con este porcentaje de sustitución se tuvo un comportamiento similar al anterior, pero más estable entre ellas, estos resultados se pueden visualizar en las figuras 20 y 21.

Tabla 21. Resultado de la variación volumétrica para CSA07. Fuente: edición propia, toma de datos realizados en la UPC

Serie/ ΔL (mm)	CSA 07-01	CSA 07-02	CSA 07-03
$\Delta L1$	-0.106%	-0.094%	-0.094%
$\Delta L2$	-0.126%	-0.114%	-0.114%
$\Delta L3$	-0.094%	-0.091%	-0.083%
$\Delta L4$	-0.094%	-0.079%	-0.079%
$\Delta L5$	0.055%	0.059%	0.083%
$\Delta L6$	0.106%	0.114%	0.110%
$\Delta L7$	0.146%	0.169%	0.165%
$\Delta L8$	0.154%	0.181%	0.181%
$\Delta L9$	0.185%	0.220%	0.209%
$\Delta L10$	0.067%	0.091%	0.091%
$\Delta L11$	0.209%	0.236%	0.232%

RESULTADOS

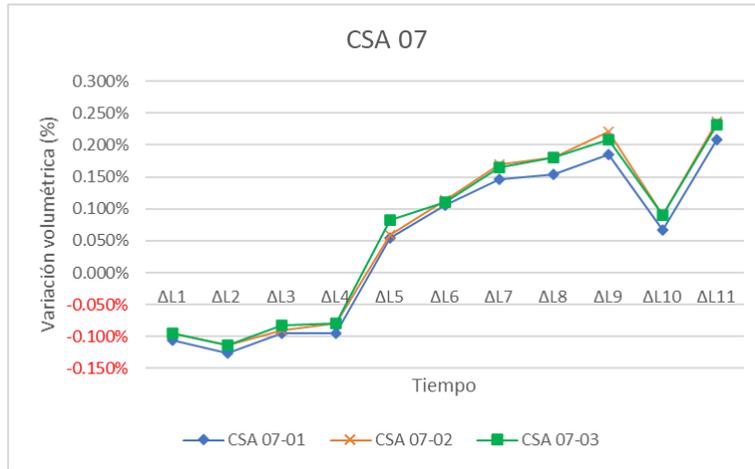


Figura 23. Representación de las variaciones volumétricas de la designación CSA07. Fuente edición propia

Tabla 22. Resultado de la variación volumétrica para CSA05. Fuente: edición propia, toma de datos realizados en la UPC

Serie/ ΔL (mm)	CSA 05-01	CSA 05-02
$\Delta L1$	-0.083%	-0.110%
$\Delta L2$	-0.102%	-0.134%
$\Delta L3$	-0.047%	-0.091%
$\Delta L4$	-0.059%	-0.106%
$\Delta L5$	0.039%	0.012%
$\Delta L6$	0.079%	0.039%
$\Delta L7$	0.161%	0.161%
$\Delta L8$	0.154%	0.122%
$\Delta L9$	0.197%	0.150%
$\Delta L10$	0.083%	0.039%
$\Delta L11$	0.232%	0.209%

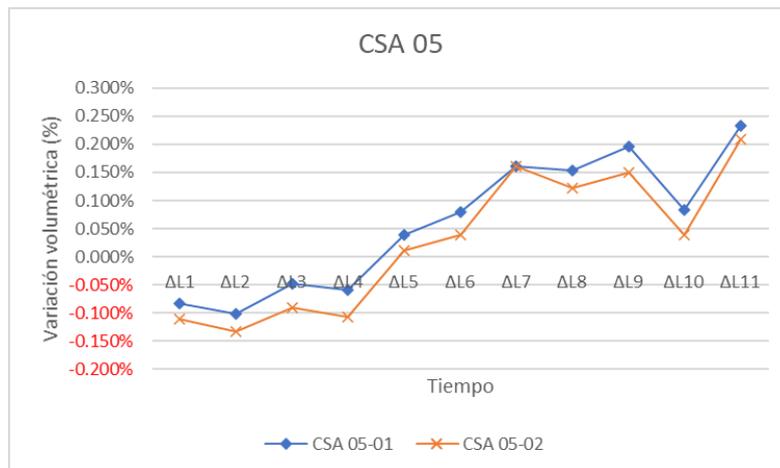


Figura 24. Representación de las variaciones volumétricas de la designación CSA05. Fuente edición propia

RESULTADOS

En la tabla 23 se presentan los resultados de las variaciones volumétricas para la designación de CSA03 presentan un comportamiento de contracción en las primeras edades y de expansión en edades más avanzadas, como en el caso de las designaciones anteriores, con la excepción de que para ultima lectura a los 28 días las contracciones presentadas fueron mayores a nivel de las edades tempranas, la representación gráfica de este comportamiento se presenta en la figura 22.

Tabla 23. Resultado de la variación volumétrica para CSA03. Fuente: edición propia, toma de datos realizados en la UPC

Serie/ ΔL (mm)	CSA 03-01	CSA 03-02	CSA 03-03
$\Delta L1$	-0.067%	-0.075%	-0.075%
$\Delta L2$	-0.091%	-0.071%	-0.059%
$\Delta L3$	-0.039%	-0.055%	-0.012%
$\Delta L4$	-0.039%	-0.047%	-0.020%
$\Delta L5$	0.016%	0.012%	0.047%
$\Delta L6$	0.000%	-0.016%	0.028%
$\Delta L7$	0.087%	0.020%	0.126%
$\Delta L8$	0.043%	0.051%	-0.004%
$\Delta L9$	0.075%	0.043%	0.028%
$\Delta L10$	-0.035%	-0.075%	-0.083%
$\Delta L11$	0.106%	0.047%	0.035%

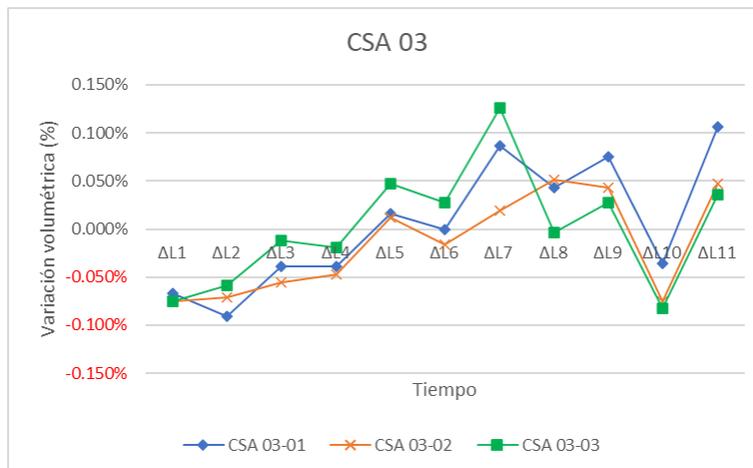


Figura 25. Representación de las variaciones volumétricas de la designación CSA03. Fuente edición propia

En la figura 23, se presenta el resumen de los promedios de todas las designaciones analizadas, en el que se puede concluir que en las edades tempranas del desmoldado de las probetas respecto a la medida inicial se obtuvieron contracciones, una vez pasada las 24h desde la primera medida se iniciaron a experimentar expansiones hasta el día 28 que se produjeron nuevamente contracciones, las mayores contracciones para este día se dieron en la designación de 28 días.

Además, se puede referir que, aunque hayan tenido comportamientos similares las intensidades de contracción y expansión fueron disminuyendo a medida en que aumentaban los % de sustitución de CSA por CV.

RESULTADOS

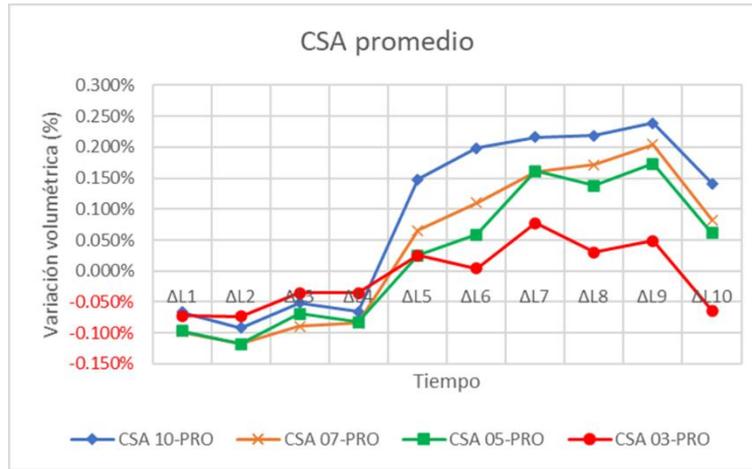


Figura 26. Resultados promedio de los resultados de ensayos de variación volumétrica de las designaciones analizadas. Fuente: elaboración propia por datos obtenidos en laboratorio de la UPC.

4.2.2 Resistencias mecánicas

4.2.2.1 Ensayo a flexión

El conjunto de probetas curadas durante 28 días fue sometidas a ensayo de resistencia a la flexión, en la tabla 24 se muestran los resultados obtenidos, el promedio entre estos resultados y las estadísticas de desviación estándar para determinar si los datos utilizados en el promedio son adecuados, es decir no están dispersos entre ellos.

Con la información de la desviación estándar obtenida, se puede establecer que los datos del laboratorio son adecuados, ya que no hay una amplia dispersión entre ellos, por lo tanto, se pueden promediar y ser utilizados para comparar entre las distintas composiciones.

Atendiendo a los promedios realizados se puede establecer que a medida en que se fue aumentando el % de sustitución del cemento de sulfoaluminato de calcio por las cenizas volantes fue disminuyendo la resistencia a la flexión entre composición en una proporción aproximada de un 6%, 22% y 43% respecto a la composición sin porcentaje de sustitución.

No obstante, no se considera de mayor relevancia ya que por lo general hay un mayor interés en la resistencia a la compresión de estos materiales y no tanto de sus características de flexión.

RESULTADOS

Tabla 24. Resultados del ensayo de la resistencia a la flexión de morteros de CSA con % de sustitución por cenizas volantes. Fuente: edición propia mediante datos obtenidos en el laboratorio de la UPC

Resistencia mecánica: Ensayo de flexión					
Resultados			Estadística		
Referencia	Fmax (kN)	ρ (Mpa)	Referencia	Desviación estándar	
CSA10-01	3.79	8.89	CSA10	Fmax (kN)	0.44
CSA10-02	2.94	6.89			
CSA10-03	3.15	7.38		ρ (Mpa)	1.04
CSA10-PROM	3.29	7.72			
CSA07-01	2.97	6.95	CSA07	Fmax (kN)	0.42
CSA07-02	2.77	6.49			
CSA07-03	3.58	8.40		ρ (Mpa)	1.00
CSA07-PROM	3.11	7.28			
CSA05-01	2.53	5.93	CSA05	Fmax (kN)	0.35
CSA05-02	2.95	6.92			
CSA05-03	2.26	5.29		ρ (Mpa)	0.82
CSA05-PROM	2.58	6.05			
CSA03-01	2.08	4.87	CSA03	Fmax (kN)	0.28
CSA03-02	1.98	4.64			
CSA03-03	1.56	3.65		ρ (Mpa)	0.65
CSA03-PROM	1.87	4.39			

La representación gráfica de los resultados de la resistencia a la flexión promedios entre composiciones se muestra en la figura 24 en el que se visualiza la disminución de la resistencia a medida que aumenta el % de sustitución.

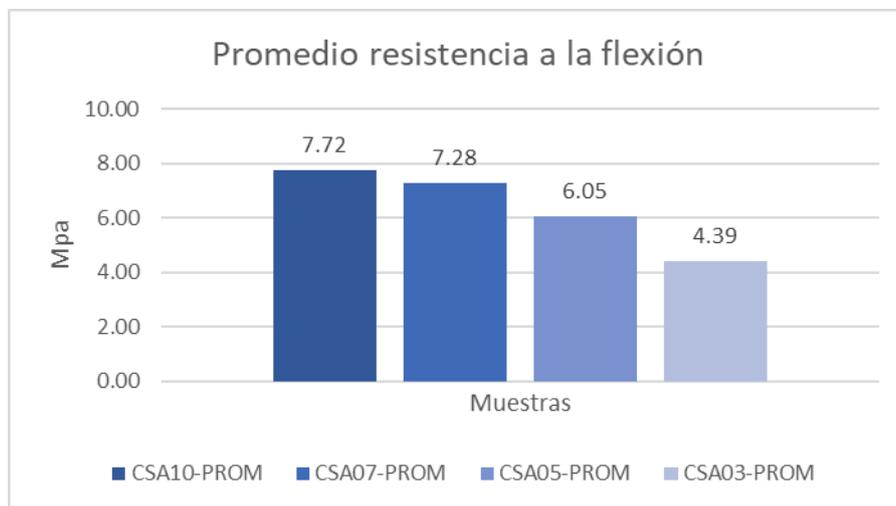


Figura 27. Resultados promedios del ensayo de la resistencia a la flexión de morteros de CSA con % de sustitución por cenizas volantes. Fuente: edición propia mediante datos obtenidos en el laboratorio de la UPC

4.2.2.2 Ensayo a la compresión

Se ensayan los semiprimas rotos de la prueba de la resistencia a la flexión para obtener los datos de la resistencia a la compresión; los resultados se presentan en la tabla 25 donde se muestran, además, el promedio entre estos resultados y las

RESULTADOS

estadísticas de desviación estándar para determinar si los datos utilizados en el promedio son adecuados, es decir no están dispersos entre ellos.

A diferencia de la desviación estándar del ensayo anterior, entre probetas o semiprismas hubo mayor dispersión, por lo tanto, lo primero realizado ha sido analizar que los datos entre composiciones fuesen adecuados, mediante el criterio Chauvenet's³² el cual consiste en calcular la desviación mediante la formulación:

$$\text{Desviación} = |x_i - \bar{x}|/s$$

Donde: x_i es el valor a comparar, \bar{x} es el promedio y s es la desviación estándar.

Luego, se compara las desviaciones de cada valor con los valores críticos del criterio de Chauvenet que dependen de la cantidad de muestras que se tenga, en este caso corresponde a 6 pruebas, por tanto, el número crítico es 1,732. A continuación, para valores de datos individuales con desviaciones mayores se consideran como datos atípicos.

Los datos de las resistencias obtenidas y la aplicación del criterio para la selección de los datos adecuados para los cálculos de las resistencias promedio, se encuentran en el anejo III.

La representación gráfica de los nuevos resultados de resistencia a la compresión promedios entre composiciones se muestra en la figura 25, en el que se visualiza la disminución de la resistencia en una proporción de un 1, 38 y 69% respecto a la proporción sin sustitución.

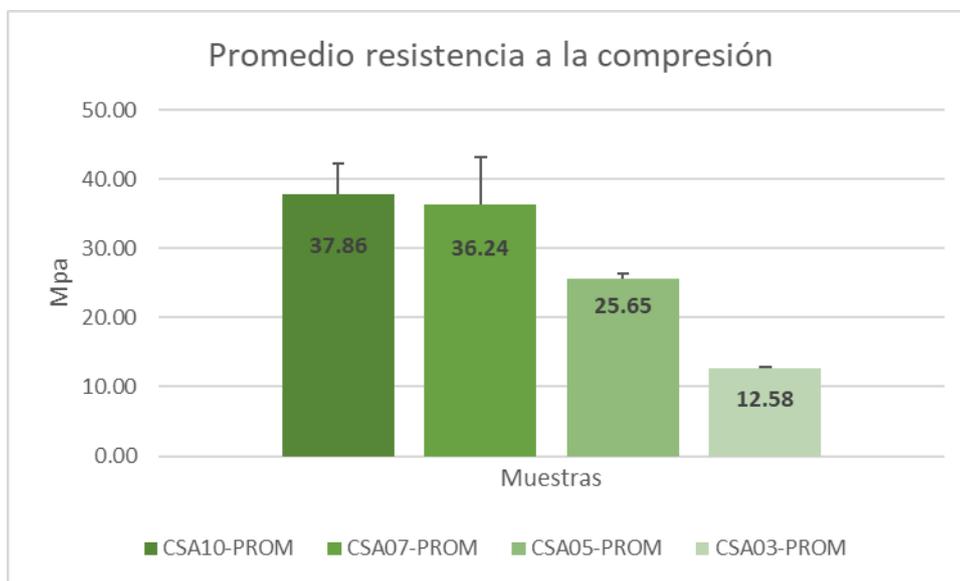


Figura 28. Resultados promedios del ensayo de la resistencia a la compresión de morteros de CSA con % de sustitución por cenizas volantes. Fuente: edición propia mediante datos obtenidos en el laboratorio de la UPC

Aunque la sustitución del CSA por CV induce a una reducción de las resistencias mecánicas a compresión, en los casos estudiados, los valores obtenidos se consideran de interés para distintas aplicaciones. En todos ellos el calor es considerable y pueden encontrarse sistemas constructivos en los que no es necesario un valor resistencia elevado.

4.3 Resumen de los resultados de las propiedades físicas analizadas

En la tabla 25, se presenta el resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de tiempos de fraguado y resistencia a la compresión de las distintas designaciones analizadas. De esta se puede decir, que el tiempo de fraguado aumenta a medida que aumenta la proporción de CV a las mezclas respecto a la composición de referencia, en contraste a la resistencia a la compresión que disminuye.

Tabla 25. Resumen de los resultados de los ensayos de tiempos de fraguado y resistencia a la compresión realizados a las designaciones seleccionadas.

Designaciones	Tiempos de fraguado		Resistencia mecánica
	Principio de fraguado (min)	Final de fraguado (min)	Compresión p (Mpa)
CSA10	20	24	37,86
CSA07	21	34	36,24
CSA05	26	32	25,65
CSA03	26	31	12,58

En el siguiente apartado, se recogen una serie de sistemas constructivos analizados que pueden ser llevados a cabo con el diseño de materiales desarrollado en este trabajo. Es importante destacar que, deben realizarse otros estudios atendiendo a la aplicación. Ejemplo en carreteras: análisis de rozamiento, drenajes, lixiviación, etc.

4.4 Aplicaciones

A continuación, se presentan algunas propuestas de aplicaciones para el diseño de mezclas desarrollados en este trabajo, analizadas en función de las propiedades físicas analizadas, especialmente: tiempos de fraguado y resistencia a compresión.

4.4.1 Aplicaciones para las designaciones de CSA07

Aplicación 1: Reparación de pavimentos de hormigón

Cuando se requiere una solución de emergencia, como el de reparación de vías en hormigón en uso como es el caso de la figura 29, podría ser ideal la mezcla de la designación CSA07, ya que presenta la misma resistencia a compresión de la mezcla de referencia y tiempos de fraguado mayor que esta, pero tiempo de fraguado menor que el CP. Lo que permite una buena trabajabilidad por el contenido de CV, pero la rehabilitación rápida por el endurecimiento y ganancia de resistencia a edades tempranas.



Figura 29. Aplicación de CSA07. Reparación de emergencia de pavimentos de hormigón. Fuente: F&H Cement.

RESULTADOS

Aplicación 2: Morteros proyectados

El mortero proyectado, presentado en la figura 30, requiere de tiempos de endurecimientos cortos, para evitar la segregación de los áridos y adherencia a la superficie; actualmente es realizado con CP y aditivo en la composición de mezcla, con el objetivo de modificar su proceso de hidratación y acelerar su fraguado. La alternativa a este caso, podría ser la designación CSA07, por su corto tiempo de fraguado, buena resistencia y trabajabilidad.



Figura 30. Aplicación de CSA07. Morteros proyectados

Aplicación 3: Hormigón estructural

Otra ventaja de la aplicación de la designación CSA07, es como hormigón estructural conforme se muestra en la figura 31, porque permite un rápido desencofrado reduciendo los tiempos de programación de los trabajos en obra.



Figura 31. Aplicación de CSA07. Elementos estructurales

4.4.2 Aplicaciones para las designaciones de CSA05

Aplicación 4: Mobiliario urbano

Un aprovechamiento de las resistencias de la designación CSA05, es mediante la fabricación de mobiliarios urbanos, como pueden verse en la figura 32.



Figura 32. Aplicaciones de CSA05. Elaboración de muebles de hormigón

Aplicación 5: Revestimiento e impresiones de bajo tráfico de hormigón

En la figura 33 se muestra posibles aplicaciones de la designación CSA05, gracias a su resistencia media este eco-material, podría ser utilizado como prefabricado para revestimientos de superficies y como hormigón impreso para zonas de bajo tráfico.



Figura 33. Aplicaciones de CSA05. Revestimientos e impresiones de hormigón

Aplicación 6: Morteros de albañilería

La figura 34 presenta la aplicación para la designación CSA05, como mortero en albañilería y revestimiento de paredes. Esta permite una buena trabajabilidad, rápido fraguado, además de su resistencia.



Figura 34. Aplicaciones de CSA05. Albañilería

4.4.3 Aplicaciones para las designaciones de CSA03

Aplicación 7: Encapsulamiento de residuos

Debido a la baja resistencia que se logra con la designación CSA03, este eco-material aún resulta aprovechable como cementante para encapsular residuos, como se muestra en la figura 35. Con la ventaja de su rápido fraguado, se logra una menor exposición al residuo.



Figura 35. Aplicaciones de CSA05. Encapsular residuos peligrosos.

CAPÍTULO V - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar las investigaciones de este trabajo experimental, se tiene como conclusiones que:

1. Una alternativa de material con menor impacto ambiental al “Cemento Portland” (CP) es el “Cemento de Sulfoaluminato de Calcio” (CSA) debido a que en su proceso de manufactura genera menos emisiones de CO₂ a la atmosfera durante el proceso de clinkerización, a causa de que las fases que poseen propiedades hidráulicas se presentan a una menor temperatura; de la misma manera, la materia prima utilizada puede ser sustituida de manera parcial por subproductos procedentes de otras industrias (ejemplo: siderúrgica, incineradoras, centrales termoeléctricas, entre otras) lo que conlleva a un menor uso de recursos naturales y disminución de disposiciones en vertedero; por último, el Clinker obtenido posee mayor porosidad por tanto en su proceso de molienda requiere menos energía.
2. Las fases anhidras mayoritarias del CSA que poseen características cementantes son la yelemita y anhidrita que al hidratarse pasan principalmente a etringita, las propiedades de la etringita son: rápido endurecimiento y elevada resistencia temprana.
3. Otra alternativa para disminuir el uso del cemento y de por si el impacto ambiental, es por medio de su sustitución parcial en la composición de las mezclas por “materiales alternativos” como lo son las cenizas volantes, poseen cualidad puzolánica, pero no hidráulicas por lo que requieren de activación en medio alcalino.
4. Las cenizas volantes utilizadas en este estudio se activaron parcialmente, al observar un descenso de la línea de difracción del cuarzo con el tiempo de curado de las muestras, lo que indico su reactividad. Dado que en los diafractogramas no se detectaron fases cristalinas diferentes a las del CSA sin sustitución, los productos de la activación no son cristalinos y deben hacerse análisis con otras técnicas para verificar qué compuestos se forman.
5. Durante el proceso de amasado las mezclas presentaban mayor fluidez al aumentar el porcentaje de sustitución de CSA por CV, lo que se refleja en una mejor trabajabilidad.
6. En la preparación de las muestras para ensayo DRX se observó que: A mayor % de sustitución de CV más fácil triturar y secado más lento; partir de 30% de CSA y 70% CV más fácil de triturar y requirieron mayor tiempo para secado y la Muestra CSA 01 luego de triturada tenía apariencia de estar húmeda a los 7, 28 y 90 días de curado.
7. Los tiempos de fraguado del CSA son menores que los del CP, lo que conlleva a poder ser utilizado en reparaciones de emergencia, estos tiempos pueden retardarse mediante el uso de las cenizas volantes, pero a mayor porcentaje de sustitución menor estabilidad volumétrica y menor resistencias mecánicas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8. Las composiciones de sustitución estudiadas de 0, 30, 50 y 70% presentaron retracción a edades tempranas desde 15 minutos a 2 horas, a partir de las 24 horas reflejaron expansiones hasta los 28 días que experimentaron contracciones respecto a la primera medición luego del desmoldado. No obstante, las variaciones volumétricas no son muy marcadas y por ello no se espera una problemática en el comportamiento del material.
9. La resistencia a la compresión a los 28 días de la composición con 30% de sustitución fue similar a la composición sin % de sustitución.

Recomendaciones:

1. Analizar las muestras a mayores edades para comprobar la mayor activación de las cenizas volantes en estos sistemas.
2. Realizar un sistema de activación híbrido de las cenizas volantes para transformar la estructura vítrea de las partículas en compactos esqueletos cementantes y obtener propiedades mejoradas.
3. Como futura líneas de trabajo, analizar otras características físicas en las aplicaciones de este material, ejemplo: durabilidad, reacción con los aceros, etc.
4. Elaborar o probar sistemas constructivos a pequeña escala con estas mezclas.

CAPÍTULO VI - BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. Damtoft JS, Lukasik J, Herfort D, Sorrentino D, Gartner EM. Sustainable development and climate change initiatives. *Cem Concr Res.* 2008;38(2):115-127. doi:10.1016/j.cemconres.2007.09.008
2. MAHASENAN N, SMITH S, HUMPHREYS K. The Cement Industry and Global Climate Change Current and Potential Future Cement Industry CO₂ Emissions. In: *Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference.* Elsevier; 2003:995-1000. doi:10.1016/b978-008044276-1/50157-4
3. Humphreys K, Mahasenan M. Towards a sustainable cement industry. Substudy 8: climate change. Published online 2002.
4. Le Saout G, Idir R, Roux J-C. *Characterisation of Perovskites in a Calcium Sulfo Aluminate Cement.* Vol 1. Springer International Publishing; 2019. doi:10.1007/978-3-030-22974-0_82
5. Telesca A, Marroccoli M, Winnefeld F. Synthesis and characterization of calcium sulfoaluminate cements produced by different chemical gypsums. *Cem Concr Res.* 2019;4(5):238-243. https://www.dora.lib4ri.ch/empa/islandora/object/empa%3A18737/datastream/PDF2/Telesca-2019-Synthesis_and_characterisation_of_calcium-%28accepted_version%29.pdf
6. Sanjuan MÁ, Chinchón S. *El Cemento Portland. Fabricación y Expedición.*; 2004.
7. Rivas Mercury J, Turrillas X, Aza Moya A, Rodríguez M, Pena P. Estudio por difracción de rayos X de la hidratación de mezclas de CaAl₂O₄ - Humo de sílice. *Bol La Soc Esp Ceram Y Vidr.* 2007;46(6):280-288. doi:10.13039/501100006280
8. Jakučionytė-Skodienė M, Liobikienė G. Climate change concern, personal responsibility and actions related to climate change mitigation in EU countries: Cross-cultural analysis. *J Clean Prod.* 2021;281. doi:10.1016/j.jclepro.2020.125189
9. Construcción y emisiones CO₂ a la atmósfera - Growing Buildings. Accessed May 17, 2021. <https://growingbuildings.com/construccion-y-emisiones-co2-a-la-atmosfera/>
10. Hanein T, Imbabi M, Glasser FP, Bannerman M. Lowering the carbon footprint and energy consumption of cement production: a novel Calcium SulfoAluminate cement production process. *1st Int Conf Gd Challenges Constr Mater.* 2016;(March).
11. Zhu H, Yu K, Li VC. Sprayable engineered cementitious composites (ECC) using calcined clay limestone cement (LC3) and PP fiber. *Cem Concr Compos.* 2021;115(May 2020). doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103868
12. Aranda MAG, De la Torre AG. *Sulfoaluminate Cement.*; 2013. doi:10.1533/9780857098993.4.488
13. Gartner E. Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements. *Cem Concr Res.* 2004;34(9):1489-1498. doi:10.1016/j.cemconres.2004.01.021
14. S. Ma, X. Shen, Y. Huang and BZ. PREPARATION AND FORMATION MECHANISM OF CALCIUM SULPHOALUMINATE. *Chinese Ceram Soc.* 2008;36:78. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotat-GXYB200801018.htm
15. Glasser FP, Zhang L. High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate-belite compositions. *Cem Concr Res.* 2001;31(12):1881-1886. doi:10.1016/S0008-8846(01)00649-4
16. Grade 72.5 Rapid-setting CSA Cement. Accessed May 19, 2021. http://www.chngn.com/product_show.asp?id=1659&class_id=298
17. García-fraile DJ. Caracterización de cenizas de centrales térmicas del norte de España para su aplicación en usos alternativos. Published online 2015.
18. Torre ÁG De, Martín-sedeño MC, León-reina L, Cuberos AJM, Álvarez-pinazo G, Aranda MAG. Hidratación de cementos de sulfoaluminato de calcio. 2011;(January).

BIBLIOGRAFÍA

19. Gomá F. *El Cemento Portland y Otros Aglomerantes*. (Editores Tecnicos Asociados SA, ed.); 1979.
 20. Castañón AM, Granda SG, Guerrero AM, Gómez-Fernández F. A research of the mineralogy phases of clinker in a Spanish cement using the method of Rietveld. *DYNA*. 2012;79(173 PART I):41-47.
 21. Chen X, Bi R, Zhang L. Effect of water-to-cement ratio on sulfo-aluminate type cementitious grouting materials. *Mag Concr Res*. 2019;71(6):298-303. doi:10.1680/jmacr.17.00244
 22. Cornejo Alvarez L. 9 . Cementos Alternativos al Cemento Portland : Química Verde SulfoAluminatoCálcico (SAC , CSA). Cementos Belíticos o Cementos de. *Es Necesario Disponer Nuevos Cem y Hormigones en el Siglo XXI*. Published online 2017:55-68. <https://nuevastecnologiasymateriales.com/wp-content/uploads/2017/09/10.pdf>
 23. Mario I, Vázquez A. SULFOALUMINATO DE CALCIO Tesis para obtener el Grado de Maestría en Ciencia de Materiales presenta : Published online 2004.
 24. Sahu, S., Majiling J. Preparation of sulphoaluminate belite cement from fly ash. *Cem Concr Res*. 1994;24(26):1065-1972.
 25. Zhou Q, Milestone NB, Hayes M. An alternative to Portland Cement for waste encapsulation-The calcium sulfoaluminate cement system. *J Hazard Mater*. 2006;136(1 SPEC. ISS.):120-129. doi:10.1016/j.jhazmat.2005.11.038
 26. Marcas PY. 2 602 093. Published online 2017:1-14.
 27. J., Salazar A. Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos. *Corporación Construir*. 2002;3 edición:1-9.
 28. Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias | CEDEX. Accessed March 19, 2021. <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/>
 29. Criado M, Palomo Á, Fernández A. *Nuevos Materiales Cementantes Basados En Cenizas Volantes. Influencia de Los Aditivos En Las Propiedades Reológicas.*; 2006.
 30. Paasch-Kaiser C. Cenizas volantes agrega una etiqueta verde a la construcción. *Univ Cent Venez*. Published online 2015:1-26. doi:10.1515/9783110366518-005
 31. Simeon J. Determinación Del Tiempo De Fraguado Inicial Y Final Del Cemento. *Univ Centroam*. 2017;(01):1-9.
 32. Chauvenet's Criterion: Definition & Example. Accessed June 19, 2021. <https://www.statology.org/chauvenets-criterion/>
- UNE EN 196-1: 2018, Método de ensayo de cementos - Parte 1: Determinación de resistencias.
- UNE EN 197-1: 2011, Cemento - Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- UNE EN 196-5:2011, Método de ensayo de cementos - Parte 5: Ensayo de puzolanidad para los cementos puzolánicos.
- UNE EN 450-1: 2013, Cenizas volantes para hormigón, Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.
- UNE EN 196-3: 2017, Método de ensayo de cementos - Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad volumétrica
- UNE EN 80113:2013, Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la expansión en autoclave

CAPÍTULO VII – ANEJOS

Anejo I – Datos para análisis de los diafractogramas

Las intensidades de los minerales analizados en los distintos tiempos de 7, 28 y 90 días se presentan en las tablas 26, 27 y 28, respectivamente.

Tabla 26. Intensidades de la etringita, yelemita, mullita y cuarzo. Fuente: DRX de las denominaciones a los 7 días.

7d	CSA		CV	
Mineral 2θ (°)	Etringita 9,10°	Yelemita 23,70°	Mullita 16,49°	Cuarzo 26,70°
CSA10	4429	3315	1	1
CSA09	4689	2426	790	646
CSA08	4561	1984	899	792
CSA07	4844	1818	939	942
CSA06	4731	1405	1094	1135
CSA05	4291	1266	1214	1192
CSA04	3938	1261	1334	1400
CSA03	3582	1337	1504	1585
CSA02	2950	1395	1683	2007
CSA01	2281	1576	1807	2703

Tabla 27. Intensidades de la etringita, yelemita, mullita y cuarzo. Fuente: DRX de las denominaciones a los 28 días.

28d	CSA		CV	
Mineral 2θ (°)	Etringita 9,10°	Yelemita 23,70°	Mullita 16,49°	Cuarzo 26,70°
CSA10	5186	1920	1	1
CSA09	5206	1920	752	620
CSA08	5204	1606	889	810
CSA07	5262	1389	900	937
CSA06	5167	1131	1020	1129
CSA05	4803	1152	1136	1086
CSA04	4174	1212	1199	1435
CSA03	3738	1206	1329	1350
CSA02	3218	1435	1682	2098
CSA01	2486	1489	1735	2231

Tabla 28. Intensidades de la etringita, yelemita, mullita y cuarzo. Fuente: DRX de las denominaciones a los 90 días.

90d	CSA		CV	
Mineral 2θ (°)	Etringita 9,10°	Yelemita 23,70°	Mullita 16,49°	Cuarzo 26,70°
CSA10	5767	1950	1	1
CSA09	5392	1868	711	680
CSA08	5550	1599	832	774
CSA07	5483	1334	899	881
CSA06	5118	1261	990	1105
CSA05	4786	1176	1199	1262
CSA04	4485	1127	1314	1541
CSA03	4038	1252	1396	1649
CSA02	3253	1423	1472	1714
CSA01	2442	1567	1752	2056

Anejo II – Lecturas nominales de las probetas para el ensayo de las variaciones volumétricas

En la tabla 29, se muestran todas las lecturas realizadas durante el ensayo. Las destacadas en color rojo (L0), corresponden a las primeras lecturas de referencias (inmediatamente luego del desmoldado); los promedios entre composiciones y lecturas son las identificadas con el color azul. Es importante destacar que entre lecturas no hubo variaciones volumétricas $\geq 10\text{mm}$, por lo que, cumple con las especificaciones teóricas de variaciones volumétricas.

Tabla 29. Lecturas realizadas a las probetas para ensayo de las variaciones volumétricas.

Longitud(mm)/ Designación	CSA 10-01	CSA 10-02	CSA 10-03	CSA 10-PRO	CSA 07-01	CSA 07-02	CSA 07-03	CSA 07-PRO	CSA 05-01	CSA 05-02	CSA 05-PRO	CSA 03-01	CSA 03-02	CSA 03-03	CSA 03-PRO
L0	11.550	11.273	12.225	11.683	12.226	10.800	11.195	11.407	12.534	12.087	12.311	12.466	11.879	10.475	11.607
L1	11.544	11.252	12.201	11.666	12.199	10.776	11.171	11.382	12.513	12.059	12.286	12.449	11.860	10.456	11.588
L2	11.539	11.244	12.195	11.659	12.194	10.771	11.166	11.377	12.508	12.053	12.281	12.443	11.861	10.460	11.588
L3	11.555	11.250	12.204	11.670	12.202	10.777	11.174	11.384	12.522	12.064	12.293	12.456	11.865	10.472	11.598
L4	11.540	11.250	12.208	11.666	12.202	10.780	11.175	11.386	12.519	12.060	12.290	12.456	11.867	10.470	11.598
L5	11.600	11.304	12.257	11.720	12.240	10.815	11.216	11.424	12.544	12.090	12.317	12.470	11.882	10.487	11.613
L6	11.616	11.315	12.268	11.733	12.253	10.829	11.223	11.435	12.554	12.097	12.326	12.466	11.875	10.482	11.608
L7	11.586	11.339	12.288	11.738	12.263	10.843	11.237	11.448	12.575	12.128	12.352	12.488	11.884	10.507	11.626
L8	11.587	11.336	12.292	11.738	12.265	10.846	11.241	11.451	12.573	12.118	12.346	12.477	11.892	10.474	11.614
L9	11.597	11.348	12.285	11.743	12.273	10.856	11.248	11.459	12.584	12.125	12.355	12.485	11.890	10.482	11.619
L10	11.569	11.318	12.269	11.719	12.243	10.823	11.218	11.428	12.555	12.097	12.326	12.457	11.860	10.454	11.590
L11	11.603	11.358	12.312	11.758	12.279	10.860	11.254	11.464	12.593	12.140	12.367	12.493	11.891	10.484	11.623

ANEJOS

Anejo III – Muestra y selección de datos del ensayo a la compresión por el criterio de Chauvenet’s

En la tabla 30, se presentan los datos de resistencia a la compresión, las estadísticas y la aplicación del criterio de Chauvenet’s. Los destacados en rojo son las resistencias seleccionadas como resultado

Tabla 30. Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión de morteros de CSA con % de sustitución por cenizas volantes, selección de datos y nuevo cálculo del promedio mediante el criterio de Chauvenets. Fuente: edición propia mediante datos obtenidos en el laboratorio de la UPC

Resistencia mecánica: Ensayo de compresión					Criterio de Chauvenet’s				
Resultados			Estadística		n=6. Valor crítico = 1,732				
Referencia	Fmax (kN)	ρ(Mpa)	Referencia	Desviación estándar	Desviación	ρ(Mpa) seleccionados	Promedio	Desviación estándar	
CSA10-01-1	71.89	44.93	CSA10	Fmax (kN)	3.33	0.3464	44.93	37.86	4.34
CSA10-01-2	95.83	59.90				1.8741			
CSA10-02-1	62.50	39.06				0.2526	39.06		
CSA10-02-2	57.34	35.84		0.5811	35.84				
CSA10-03-1	56.36	35.22		ρ(Mpa)	9.80	0.6444	35.22		
CSA10-03-2	54.82	34.26				0.7424	34.26		
CSA10-PROM	66.46	41.54							
CSA07-01-1	31.71	19.82	CSA07	Fmax (kN)	4.58	2.3217		36.24	6.98
CSA07-01-2	47.92	29.95				1.2160	29.95		
CSA07-02-1	69.41	43.38				0.2500	43.38		
CSA07-02-2	44.73	27.96		1.4332	27.96				
CSA07-03-1	60.62	37.88		ρ(Mpa)	9.16	0.3504	37.88		
CSA07-03-2	67.22	42.01				0.1004	42.01		
CSA07-PROM	65.75	41.09							
CSA05-01-1	19.19	11.99	CSA05	Fmax (kN)	1.00	2.4371		25.65	0.63
CSA05-01-2	39.26	24.53				0.1995	24.53		
CSA05-02-1	41.35	25.84				0.0343	25.84		
CSA05-02-2	41.50	25.94		0.0521	25.94				
CSA05-03-1	41.45	25.91		ρ(Mpa)	5.60	0.0468	25.91		
CSA05-03-2	41.64	26.02				0.0664	26.02		
CSA05-PROM	41.04	25.65							
CSA03-01-1	20.22	12.64	CSA03	Fmax (kN)	0.99	0.2416	12.64	12.58	0.33
CSA03-01-2	20.73	12.95				0.2933	12.95		
CSA03-02-1	19.32	12.07				1.2250	12.07		
CSA03-02-2	20.37	12.73		0.0863	12.73				
CSA03-03-1	21.58	12.49		ρ(Mpa)	0.58	0.5004	12.49		
CSA03-03-2	22.08	13.8				1.7599			
CSA03-PROM	20.72	12.78							