



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL: CONSTRUCCIÓN

CARACTERIZACIÓN DE LA REACTIVIDAD DE ARCILLAS CALCINADAS PARA SU USO EN CEMENTOS SOSTENIBLES.

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Tutor/es del Trabajo Fin de Máster:

PROF. ÁLVARO PICAZO IRANZO

Dr. por la U.P.M.

PROF. MIGUEL ÁNGEL DE LA RUBIA LÓPEZ

Dr. Ciencias Químicas.

ELVIS GUZMÁN DOMÍNGUEZ

Ingeniero Civil.

MADRID, 2023



AGRADECIMIENTOS

Ante todo, quiero expresar mi más sincero agradecimiento, primeramente, a Dios, por permitirme estar acá terminando esta meta profesional y a todas las personas que han sido participes, de una forma u otra en este trabajo.

A mis tutores Dr. Miguel Ángel de la Rubia López y Dr. Álvaro Picazo Iranzo, por todas las horas dedicadas y la paciencia para este proyecto; a mi guía de laboratorio Iliá López, por estar siempre disponible y presente en cada paso del trabajo siendo una guía, dándome ánimo y apoyándome.

A la Dra. Amparo Moragues, por proponer este trabajo y darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo.

A la empresa Tolsa mi más sincero agradecimiento por tan gentilmente habernos facilitado las muestras de las arcillas calcinadas y su respectivo análisis químico, para llevar a cabo esta investigación.

A mis compañeros del master / laboratorio, gracias por el apoyo, paciencia, palabras de aliento y horas compartidos juntos durante la campaña experimental; a mis amistades, tanto de España como de Ecuador, por sus palabras de ánimo y dedicarme su tiempo cuando lo necesité.

Y, por último, pero igual de importante, a la familia, a mis hijos, mis padres y demás familiares por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y obviamente durante este proceso.



RESUMEN

La industria asociada al cemento es responsable del 8% de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a nivel mundial (M.Sader,2019), superando las emisiones generadas por la aviación (2.5%) y acercándose a las emisiones de la agricultura (12%) (Rodger, 2018). Es necesario destacar que más de la mitad de estas emisiones provienen del proceso de clinkerización de la mezcla de caliza y arcilla, que es el proceso térmico que da lugar a la formación de las fases del clinker, el componente principal del cemento Portland. La parte restante procede de la quema de los combustibles utilizados para alcanzar la temperatura de clinkerización (1450-1550°C). Las emisiones de CO_2 proceden mayoritariamente de la descomposición de la caliza en óxido de calcio y CO_2 .

El objetivo principal de este estudio es diseñar morteros LC3 con reducción del contenido de cemento con buenas propiedades mecánicas y elevada durabilidad frente a agentes agresivos, con una sustitución parcial del 45% del cemento Portland por materiales más sostenibles de muy elevada disponibilidad, como son las arcillas calcinadas, en la producción de pastas, morteros y hormigones utilizados en obras civiles y construcción. La sustitución de parte del cemento por arcilla calcinada mejora la sostenibilidad de la industria del cemento al reducir la cantidad de cemento utilizado y disminuir las emisiones de CO_2 , lo que contribuye a la reducción de la huella de carbono en la fabricación de las diferentes estructuras.

Para llevar a cabo esta sustitución, se realizó una caracterización de las arcillas calcinadas estudiadas (1A y 5TC) mediante ensayos de caracterización micro y macroestructural mediante diferentes técnicas como Análisis Térmico Diferencial (ATD) para cuantificar los productos de hidratación, o la caracterización mecánica y durabilidad frente a agentes agresivos como cloruros y carbonatación de acuerdo a norma.

Los resultados obtenidos con la arcilla 1A permiten obtener morteros sostenibles LC3 con una reducción de un 45 % de cemento con buenas propiedades mecánicas y elevada durabilidad que permitirían desarrollar estructuras de hormigón sostenibles y de larga vida útil.



ABSTRACT

The cement industry is responsible for 8% of global carbon dioxide (CO₂) emissions (M. Sader, 2019), surpassing emissions generated by aviation (2.5%) and approaching emissions from agriculture (12%) (Rodger, 2018). It is important to highlight that more than half of these emissions come from the clinkerization process of the limestone and clay mixture, which is the thermal process that leads to the formation of clinker phases, the main component of Portland cement. The remaining emissions come from the combustion of fuels used to reach the clinkerization temperature (1450-1550°C). CO₂ emissions mainly result from the decomposition of limestone into calcium oxide and CO₂.

The main objective of this study is to design LC3 mortars with reduced cement content, while maintaining good mechanical properties and high durability against aggressive agents. This is achieved through a partial substitution of 45% of Portland cement with more sustainable materials that are readily available, such as calcined clay, in the production of pastes, mortars, and concrete used in civil engineering and construction. Substituting part of the cement with calcined clay improves the sustainability of the cement industry by reducing the amount of cement used and decreasing CO₂ emissions, thereby contributing to the reduction of carbon footprint in the manufacturing of different structures.

To carry out this substitution, a characterization of the studied calcined clays (1A and 5TC) was conducted through micro and macrostructural characterization tests using various techniques such as Differential Thermal Analysis (DTA) to quantify hydration products, as well as mechanical and durability characterization against aggressive agents such as chlorides and carbonation according to standards.

The results obtained with clay 1A allow for the development of sustainable LC3 mortars with a 45% reduction in cement content, while maintaining good mechanical properties and high durability. These mortars enable the construction of sustainable concrete structures with long service life.



INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.	14
2.1. Componentes principales del hormigón.	14
2.1.1 Cementos compuestos por clinker. Composición química.	15
2.1.2 Contaminación producida en el proceso de obtención del cemento común.	18
2.1.3 Cementos menos contaminantes. Tendencias actuales.	18
2.2 Cementos eco sostenibles.	21
2.2.1 Cementos ecológicos comerciales.	23
2.3 Cementos con adiciones.	24
2.3.1. Escorias de alto horno.	28
2.3.2. Cenizas volantes (“ashcrete”).	29
2.3.3. Cementos con adiciones de ceniza de cascara de arroz.	30
2.3.4. Cementos con filler calizo.	31
2.3.5. Cementos bajos en carbono. (LC3)	32
3. OBJETIVO PRINCIPAL	35
3.1 OBJETIVOS SECUNDARIOS	35
4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.	36
4.1. Materiales utilizados. Proceso de fabricación de las muestras.	36
4.1.1 Materiales utilizados.	36
4.1.1.1. Cemento de Referencia.(CEM I 42,5 R) .	37
4.1.1.2 Árido fino.	38
4.1.1.3 Metacaolín.	38
4.1.1.4 Filler Calizo.	39
4.1.1.5 Arcillas Calcinadas.	39
4.1.1.6 Superplastificante.	40
4.1.1.7 Agua de abastecimiento del ayuntamiento de Madrid.	41
4.1.1.8 Agua destilada.	41
4.1.2 Dosificaciones.	41
4.1.3 Proceso de amasado de las muestras. Morteros y Pastas.	42
4.1.4 Fabricación y curado de probetas.	44



4.2 Ensayos de laboratorio realizados.	45
4.2.1 Ensayo de caracterización de morteros.	45
4.2.1.1 Ensayo de consistencia.	45
4.2.1.2 Análisis Térmico Diferencial. (ATD).	47
4.2.1.3 Ensayo de fraguado o trabajabilidad de morteros.	49
4.2.2 Propiedades mecánicas.	50
4.2.2.1 Resistencia a flexo-tracción.	51
4.2.1.2. Resistencia a compresión.	52
4.2.3 Ensayos de durabilidad.	53
4.2.3.1 Resistividad	55
4.2.3.2 Penetración de Cloruros.	56
4.2.3.2.1 Migración acelerada de cloruros.	57
4.2.2.2.2 Difusión de cloruros.	62
4.2.3.3 Carbonatación.	67
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
5.1 Ensayos de caracterización.	70
5.1.1 Ensayo de consistencia.	70
5.1.2 Análisis Térmico Diferencial. (ATD).	71
5.1.3 Ensayo de fraguado.	77
5.2 Propiedades mecánicas.	78
5.2.1 Resistencia a compresión.	78
5.1.2. Resistencia a flexo-tracción.	80
5.2 Durabilidad.	81
5.2.1 Resistividad	81
5.2.2. Penetración de cloruros	82
5.2.2.1 Migración acelerada de cloruros.	82
5.2.2.2 Difusión de cloruros.	86
5.2.2.2.1 Cloruros Libres.	87
5.2.2.2.2 Cloruros combinados o totales.	88
5.2.3. Carbonatación.	90
6. CONCLUSIONES	91
6.1 Conclusiones parciales	91
6.2 Conclusiones Generales	92
7. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION:	92
8. BIBLIOGRAFÍA.	93



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general de la fabricación del cemento. (Sanjuán Barbudo, M. Á.)	12
Figura 2. Balance de material para la producción de 1000 kg de cemento. (Sanjuán Barbudo, M. Á.).....	12
Figura 3. Gel CSH a 28 días de hidratación. (Alcaraz (2012)).....	17
Figura 4. Portlandita a siete días de hidratación. (Alcaraz (2012).)	17
Figura 5. Etringita a 7 días de hidratación. (Alcaraz (2012).).....	17
Figura 6. Porciones de materiales para la fabricación de LC3. (Echeverría Santos, C. M. (2022)).	34
Figura 7. Cemento CEM I 42,5 R. Modalidad a granel. (Cementos Tudela, (2018)).....	37
Figura 8. Arena normalizada. (Fotografías propias)	38
Figura 9. Presentación comercial metacaolín Tolsa. (Fotografías propias).	39
Figura 10. Presentación comercial filler calizo. (Fotografías propias).	39
Figura 11. Muestras arcillas 1A y 5TC. (Fotografías propias).	40
Figura 12. Super plastificante ViscoCrete - 6003 NG. De izquierda a derecha, (Fotografía propia), (fotográfica catálogo Sika).....	40
Figura 13. Equipo de destilación. (Fotografías propias).	41
Figura 14. De izquierda de derecha, moldes para probetas prismáticas y cilíndricas para morteros; maquina compactadora por golpes. (Fotografías propias).....	43
Figura 15. De izquierda a derecha, material dosificado para elaborar morteros y pastas, mesa vibratoria y moldes para pastas. (Fotografías propias).	43
Figura 16. De izquierda a derecha, elaboración probeta prismática, desmoldado de probeta prismática y elaboración probeta prismática para pastas. (Fotografías propias).	44
Figura 17. De izquierda a derecha, ensayo de consistencia para pastas (Aguja de Vicat) y ensayo consistencia de morteros (penetración del pistón). (Fotografías propias).	46
Figura 18. De izquierda a derecha, equipo LABSYS, de SETRAM Instrumentación, cámara de vacío, y probetas prismáticas de pastas (Fotografías propias).	48
Figura 19. Equipo para ensayo de fraguado en morteros. (Fotografías propias).	49
Figura 20. Probetas prismáticas utilizadas para ensayos de propiedades mecánicas. (Fotografías propias).	51
Figura 21. Equipo de ensayo a flexo tracción. (Fotografías propias).	52
Figura 22. Equipo de ensayo a compresión. (Fotografías propias).....	53
Figura 23. Seccionado de probetas para ensayos. (Esquemas propios).	54
Figura 24. Equipo de medición para el ensayo de Resistividad (Fotografías propias).	55
Figura 25. De izquierda a derecha, probetas en cámara de vacío, cámara de vacío + disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, solo disolución. (Fotografías propias).....	58
Figura 26 Armado del ensayo de migración acelerada. (Fotografías propias).	59
Figura 27 De izquierda a derecha, ensayo brasileño, probetas Arcilla 5. (Fotografías propias).....	60
Figura 28 Probetas Arcilla 1. (Fotografías propias).	60
Figura 29 Esquema instructivo para análisis de probetas (NT BUILD 492, 1999).	61



Figura 30 De izquierda a derecha, probetas con la cara expuesta sumergida en disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, aplicación de resina, productos componentes de la resina. (Fotografías propias).....	63
Figura 31 Probetas de Arcillas 5TC, lote A y B, taladro columna. (Fotografías propias).....	63
Figura 32 Probetas de Arcillas 1 A y 5TC, lote A y B, recipientes para receptar muestras del lijado cada 1mm. (Fotografías propias).....	64
Figura 33 De izquierda a derecha, proceso de agitación mecánica, Matraces con embudos y filtros para filtrar la mezcla. (Fotografías propias).....	65
Figura 34 De izquierda a derecha, adición de 2ml de HNO_3 , adición de 20ml de Ácido Acético Y 0.50 gr de acetato de sodio. (Fotografías propias).....	66
Figura 35 Equipo potenciométrico con solución de nitrato de plata para cuantificar concentraciones de cloruros. (Fotografías propias).....	66
Figura 36. Cámara de carbonatación, dispositivo control de concentración de CO_2 , sensor de humedad, temperatura y probetas colocadas en la cámara de carbonatación. (Fotografías propias).....	68
Figura 37. De izquierda a derecha, maquina cortadora de hormigón / morteros, probeta cortada en rebanadas. (Fotografías propias).....	69
Figura 38. De izquierda a derecha, Arcilla 1 A y Arcilla 5 TC. (Fotografías propias).....	70
Figura 39 Gráficos dTG vs Temp a 2 días de edad para Arcilla 1A y Arcilla 5TC (Propia autoría).....	73
Figura 40 Gráficos dTG vs Temp. a 7 días de edad para Arcilla 1A y Arcilla 5TC (Propia autoría).....	73
Figura 41 Gráficos dTG vs Temp. a 14 días de edad para Arcilla 1A y Arcilla 5TC (Propia autoría).....	73
Figura 42 Gráficos dTG vs Temp. a 28 días de edad para Arcilla 1A y Arcilla 5TC (Propia autoría).....	74
Figura 43 Gráficos dTG vs Temp. a 2, 7 y 28 días de edad para cemento Referencia 45.5 (Propia autoría).....	74
Figura 44 Comparación portlandita total de Arcilla 1A, Arcilla 5TC y mortero de referencia a los 2,7,14 y 28 días de hidratación. (Autoría Propia).....	76
Figura 45 Comparación de porcentajes de agua totales a 2, 7 y 28 días de hidratación en Arcilla 1A, Arcilla 5TC y mortero de referencia. (Autoría Propia).....	77
Figura 46 Gráfico comparativo de resistencias a compresión (Autoría Propia).....	79
Figura 47 Gráfico comparativo de resistencias a flexotracción (Autoría Propia).....	80
Figura 48 Gráfico comparativo de valores de resistividad a morteros con la Arcilla 1A, Arcilla 5TC y cemento de referencia 42.5. (Autoría Propia).....	82
Figura 49 Gráfico comparativo de los coeficientes de migración de cloruros promedio para los tres cementos. (Autoría Propia).....	83
Figura 50 De izquierda a derecha, muestra de probetas del ensayo de migración acelerada en cloruros Arcilla 5TC y Arcilla 1A (Autoría Propia).....	84
Figura 51 Gráfico comparativo de penetraciones máximas medias en las probetas analizadas (Autoría Propia).....	85
Figura 52 Perfil de difusión de cloruros libres Arcilla 1A (B) y Arcilla 5TC (B) (Autoría Propia).....	87
Figura 53 Perfil de difusión de cloruros libres Arcilla 1A (A) y Arcilla 5TC (A) (Autoría Propia).....	87
Figura 54 Perfil de difusión de cloruros totales Arcilla 1A (B) y Arcilla 5TC (B) (Autoría Propia).....	88



Figura 55 Perfil de difusión de cloruros totales Arcilla 1A (A) y Arcilla 5TC (A) (Autoría Propia) 89

Figura 56 Evolución de las profundidades de carbonatación a 7 y 28 días para morteros con Arcilla 1A y Arcilla 5TC (Autoría Propia)..... 90



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de los cementos y sus componentes según la norma UNE-EN 197-1:2011.....	27
Tabla 2. Comparación entre cemento portland CEM 1, Filler calizo y LC3. (Echeverría Santos, C. M. (2022)).....	34
Tabla 3. Composición química cemento tipo I 42.5.	37
Tabla 4. Composición Química metacaolín Tolsa en porcentajes.	38
Tabla 5. Análisis químico arcillas 1A y 5TC.....	40
<i>Tabla 6 Dosificación Morteros con arcilla calcinada.</i>	42
Tabla 7 Dosificación Pastas con arcilla calcinada.	42
Tabla 8 Tabla de valores de ajuste de voltaje y tiempos según amperaje inicial del ensayo (NT BUIL 492, 1999).	59
Tabla 9 Resultados ensayo de consistencia para morteros. en las Arcillas 1A y 5TC. (Autoría propia).	71
Tabla 10 Resultados ensayo de consistencia para pastas. en las Arcillas 1A y 5TC. (Autoría propia).	71
Tabla 11 Tabla valores de pérdida de masa asociado a temperaturas. Arcilla 5TC. (Autoría propia).	74
Tabla 12 Tabla valores de pérdida de masa asociado a temperaturas. Arcilla 1A. (Autoría propia).	75
Tabla 13 Tabla valores de pérdida de masa asociado a temperaturas. Mortero de Referencia. (Autoría propia).	75
Tabla 14 Tabla valores de Portlandita Total. Arcillas 1A y 5TC. (Autoría propia).....	76
Tabla 15 Tabla valores del agua total combinada en las Arcilla 1A ,Arcilla 5TC y mortero de referencia a los 2,7,14 y 28 días de hidratación. (Autoría propia).....	76
Tabla 16 Resultados ensayo de fraguado Arcilla 1A. (Autoría propia).....	77
Tabla 17 Resultados ensayo de fraguado Arcilla 5TC. (Autoría propia).	78
Tabla 18 Resultados de propiedades mecánicas. Resistencia a compresión (Autoría Propia)	78
Tabla 19 Resultados de propiedades mecánicas. Resistencia a flexo tracción (Autoría Propia).	80
Tabla 20 Resultados de ensayo de resistividad. (Autoría Propia).	81
Tabla 21 Coeficientes de migración de cloruros obtenidos de ambas series de muestras para la Arcilla 1A, Arcilla 5TC y cemento de referencia. (Autoría Propia)	83
Tabla 22 Valores de penetración máxima por cada muestra. (Autoría Propia).....	85
Tabla 23 Intensidad de corriente inicial y final obtenidos en el ensayo de migración acelerada para todas las muestras. (Autoría Propia)	85
Tabla 24 Voltaje obtenidos en el ensayo de migración acelerada para todas las muestras. (Autoría Propia).....	86
Tabla 25 Coeficiente de difusión efectivo de cloruros para las Arcilla 1 A y Arcilla 5TC. (Autoría Propia).....	88
Tabla 26 Coeficiente de difusión aparente de cloruros para las Arcilla 1 A y Arcilla 5TC. (Autoría Propia).....	89
Tabla 27 Profundidad de carbonatación probetas morteros con Arcilla 1A y Arcilla 5TC. (Autoría Propia).....	90



1. INTRODUCCIÓN

La huella de carbono, es un indicador ambiental que representa la cantidad de CO₂ emitido al ambiente, ya sea directa o indirectamente como resultado de una actividad determinada.

En la industria de la construcción moderna, el hormigón juega un papel fundamental y su utilización se ha difundido y diversificado en todo el mundo, llegando a convertirse en el material fabricado por el hombre más utilizado de la historia y solo es superado por el agua, como el elemento de mayor consumo a nivel mundial.

El hormigón se puede definir como una mezcla compuesta por cemento, áridos de diferentes granulometrías, agua y aditivos (opcional), siendo el cemento el conglomerante hidráulico con capacidad de unir el resto de componentes, debido a la reacción de hidratación que ocurre cuando es amasado con agua; llegando a fraguar y endurecer, manteniendo su estabilidad y propiedades mecánicas incluso bajo el agua.

La industria asociada al cemento, de acuerdo al centro de estudios británico Chatham House 2016, ya era la fuente de aproximadamente 2.200 millones de toneladas de CO₂ hacia el 2016, lo que representa el 8% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) del mundo (*M. Sader, 2019*) (Parada Rocha, K. A. (2022)). Según (*Rodger, L. (2018)*), incluso si esta industria fuese un país, tendría el tercer puesto como emisor más grande del mundo, detrás de países como China y EE.UU.

Esta industria emite a la atmósfera más CO₂ que el combustible utilizado para la aviación (2,5%) y no está muy lejos del que emite la agricultura (12%). (*Rodger, L. (2018)*).

Cabe destacar que más de la mitad de estas emisiones provienen de la clinkerización, es decir, el proceso de formación de las fases del clinker.

El clinker es el componente principal del cemento juntamente con el yeso; para su producción se calcina la piedra caliza, compuesta esencialmente de carbonato cálcico (Ca CO₃), a unos 900°C para generar óxido de calcio o cal (Ca O), liberando grandes cantidades de CO₂ en el proceso. Posteriormente, el Ca O reacciona en el horno a

altas temperaturas (entre 1400-1500 ° C) con sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxidos de hierro (Fe_2O_3), para formar silicatos, aluminatos y ferritas de calcio, principales constituyentes del clínker. Este proceso está representado en las Figuras 1 y 2 respectivamente.



Figura 1. Esquema general de la fabricación del cemento. (Sanjuán Barbudo, M. Á.)

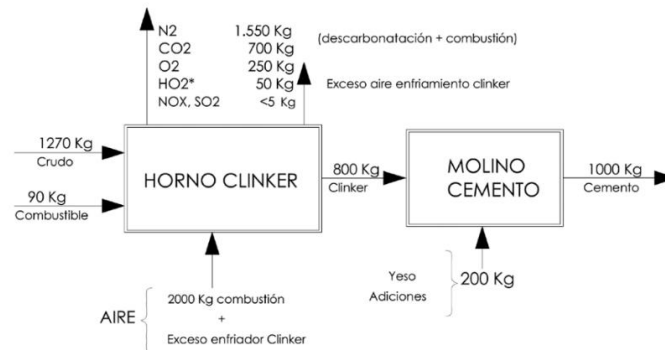


Figura 2. Balance de material para la producción de 1000 kg de cemento. (Sanjuán Barbudo, M. Á.)

Este proceso de calentar el horno a altas temperaturas, se realiza mediante diferentes tipos de combustibles, generando también emisiones asociadas a la combustión.

En el proceso de la fabricación de cemento también ocurren emisiones de partículas por la manipulación de materias primas, la molienda del clínker o los procesos de almacenaje y envasado.

Debido al ritmo de construcción, ascendente en la última década con este material, se estima que las áreas edificadas del mundo se duplicarán en los próximos 40 años,



lo que significaría que la producción de cemento aumentaría un 25% de cara al 2030. (Rodger, L. (2018)).

Esta situación junto con el deterioro paulatino evidente del medio ambiente, han llevado a los gobiernos de todo el mundo a tomar medidas para frenar esta situación y van direccionadas a reducir las emisiones de CO₂ de forma general con el objetivo de lograr la neutralidad climática para el 2050.

En la industria de la construcción esta mejora medioambiental va direccionada a la sustitución paulatina de porcentajes de cementos Portland en hormigones y morteros

y su sustitución por adiciones que potencien las propiedades mecánicas y mejoren la durabilidad y a la vez hacer a la industria más sostenible.

Por tales motivos, en este estudio se buscan estrategias sostenibles y de elevada durabilidad para la sustitución del cemento por otros componentes, analizando las propiedades físicas y químicas de dos arcillas potencialmente candidatas para ser ocupadas como sustitutas parciales de un 45 % (30% arcilla +15 % filler calizo) del cemento en morteros, precautelando y potenciando la estabilidad en sus propiedades mecánicas y de durabilidad.



2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.

El hormigón o concreto es un material formado por un conglomerante, generalmente cemento tipo Portland, al que se añaden partículas o fragmentos de agregados, ya sean gruesos (grava) o finos (arena), agua, adiciones y aditivos específicos, según el uso y las características que se les quiera brindar.

2.1. Componentes principales del hormigón.

El Código Estructural (2021), indica las características que deben cumplir los componentes del hormigón para satisfacer la normativa. En este apartado mencionaremos algunas de las características generales que presentan los componentes que se requieren:

Cemento: El cemento es un polvo fino que actúa como aglutinante. Generalmente, se utiliza cemento Portland, que es una mezcla de clinker, yeso y otros materiales adicionales. El cemento se mezcla con agua para formar una pasta que luego se combina con los otros componentes.

· **Agua:** El agua es necesaria para activar la reacción química del cemento y permitir que se endurezca. La misma, ya sea la utilizada, para amasado o curado del hormigón en obra no debe contener ninguna contaminación en cantidades tales que afecten las propiedades mecánicas, la durabilidad del hormigón y la protección de las armaduras frente a la corrosión. La cantidad utilizada debe ser suficiente para que la mezcla sea trabajable y se pueda colocar correctamente, pero no demasiado para evitar una excesiva retracción o debilidad del hormigón.

· **Áridos:** Los áridos deben presentar características que posibiliten el logro de las resistencias y la durabilidad programada del hormigón utilizado en su fabricación. Es imperativo que dichos áridos cuenten con la certificación de calidad europea CE de acuerdo con la norma (UNE-EN 12620, 2009). Únicamente se emplearán áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas) que cumplan con dicha norma, los cuales pueden provenir tanto de rocas trituradas como de rocas redondeadas. De manera



similar, se permite la utilización de escorias de alto horno enfriadas por aire o áridos reciclados.

- ✓ **Árido fino:** La arena es el árido fino más utilizado y debe tener a una fracción 0/4 del árido que sea mínimo de arena (SE_4). Si las obras se encuentren expuestas a ambientes agresivos con exposición (X0 o XC), el uso de arenas procedentes de la trituración de rocas calizas o dolomías, está limitado por la fracción anteriormente mencionada. Cabe destacar que estos áridos llenan los espacios entre los agregados gruesos y mejoran la trabajabilidad del hormigón.
- ✓ **Árido grueso:** Los agregados gruesos, como la grava o la piedra triturada, proporcionan resistencia y estabilidad al hormigón. La calidad de estos áridos se verifica mediante el ensayo de Los Ángeles donde se evidencia su comportamiento al desgaste. La normativa solicita una categoría LA40.

Posibles aditivos: Los aditivos son sustancias químicas que se añaden al hormigón durante el proceso de mezcla para modificar o mejorar sus propiedades. Estos aditivos se utilizan para lograr características específicas en el hormigón, como la resistencia, la trabajabilidad, el tiempo de fraguado, la durabilidad, la permeabilidad, la reducción de aire y la adherencia. La elección del aditivo en una obra dependerá de los requisitos del proyecto y las características deseadas del hormigón.

Una vez analizados los principales componentes que conforman este material tan utilizado por la sociedad actualmente, nos centraremos en este estudio, específicamente en el cemento y sus variantes.

2.1.1 Cementos compuestos por clinker. Composición química.

El cemento Portland está compuesto por clinker y yeso en su inmensa mayoría. El clinker es el resultado del tratamiento térmico de arcillas y calizas, sometidas a altas temperaturas (1300-1500°C), obteniéndose cuatro componentes: silicato tricálcico (C_3S); silicato bicálcico (C_2S); aluminato tricálcico (C_3A), y ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF).



Estos compuestos tienen su origen, por una parte, en la descarbonatación de materiales calizos, como creta o caliza y por otra parte con el calentamiento de materiales arcillosos como arcillas, pizarras y esquistos. (Vásquez, R. (2012)).

La calidad óptima del cemento se obtiene cuando las proporciones requeridas de los cuatro componentes están homogéneamente distribuidos ya que estos componentes son los responsables de las propiedades mecánicas del cemento.

Cuando el cemento Portland interactúa con el agua se produce un proceso de hidratación y con este, una serie de reacciones químicas que propician las fases solidas hidratadas, según el siguiente esquema:

Cemento + H₂O → Tobermorita (gel C-S-H) + Portlandita (Ca (OH)₂) + Monosulfoaluminatos (Etringita) + aluminatos cálcicos hidratados. Etringita es trisulfoaluminato. La ettringita después de horas o algún día evoluciona a monosulfoaluminato.

Los componentes del cemento reaccionarán, cada uno, a diferentes velocidades; produciendo la Tobermorita (geles CSH), Portlandita (hidróxido de calcio) y Etringita, en diferentes fases y cantidades, la *ettringita evoluciona a monosulfoaluminato*.

Las cantidades de estos componentes dictaminan el comportamiento mecánico y durable de la mezcla. Al diseñar cementos con otros componentes diferentes al clinker debemos de garantizar la producción de estos componentes en las cantidades correctas, con el fin de que cumplan con las propiedades mecánicas y de durabilidad, esperadas para un hormigón convencional.

En la Figuras 3 a 5 se muestran las imágenes de microscopía de los componentes del cemento Portland hidratado, obtenidas de los ensayos realizados por Alcaraz (2012).

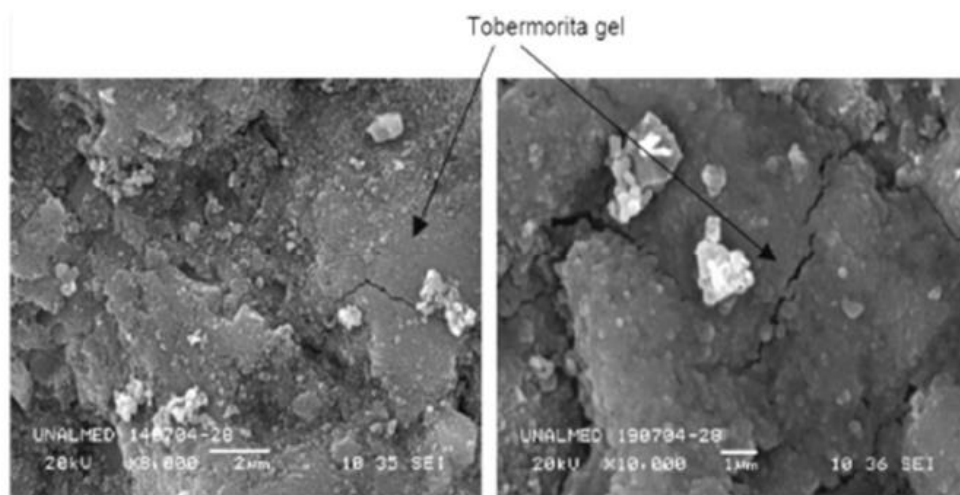


Figura 3. Gel CSH a 28 días de hidratación. (Alcaraz (2012))

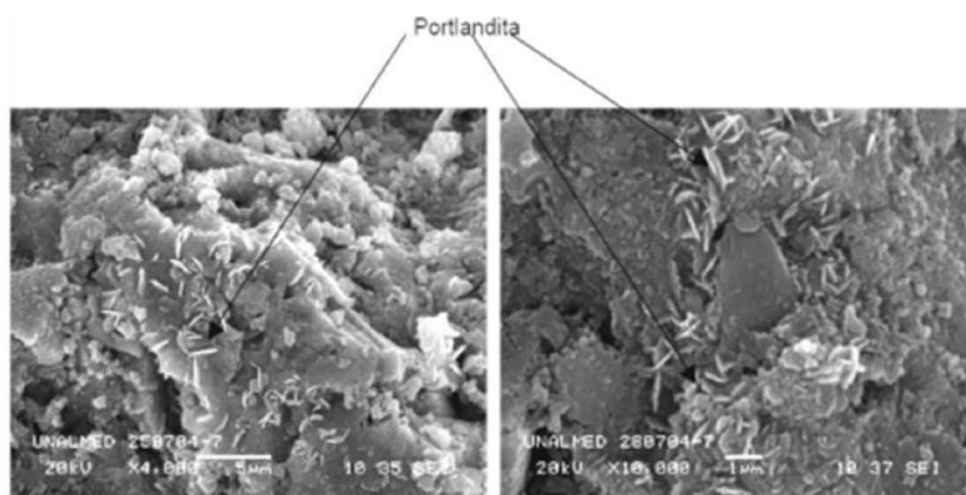


Figura 4. Portlandita a siete días de hidratación. (Alcaraz (2012).)

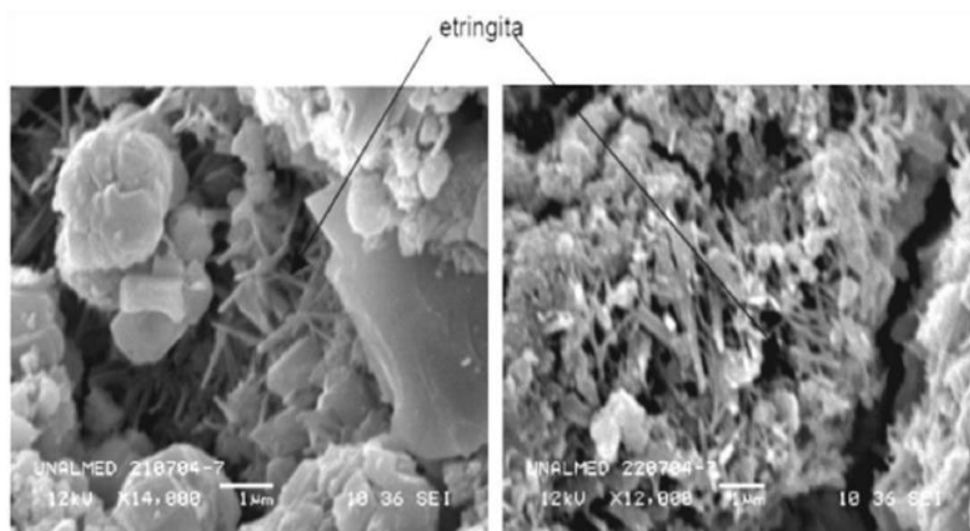


Figura 5. Etringita a 7 días de hidratación. (Alcaraz (2012).)



2.1.2 Contaminación producida en el proceso de obtención del cemento común.

El proceso de clinkerización se define como la fusión de las calizas y las arcillas que conforman el clinker en hornos de alta temperatura, con rangos que oscilan entre los 1300 y 1500°C.

Durante esta etapa, los hornos experimentan una considerable pérdida de calor y liberan grandes cantidades de materiales contaminantes a la atmósfera. Proceso descrito en las Figuras 1 y 2.

En particular, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) generadas durante este proceso son extremadamente difíciles de controlar. Sin embargo, se ha logrado implementar filtros en los hornos mediante el encapsulado de partículas de tamaño mediano, lo cual ha permitido mitigar en parte dichas emisiones.

La producción de la industria cementera ha experimentado un crecimiento exponencial, aumentando aproximadamente 30 veces desde el siglo pasado, siendo el principal productor de esta industria el continente asiático, en particular China. Igualmente se espera que el crecimiento de esta industria continúe, ya que las previsiones indican que las áreas edificadas del mundo se duplicarán en los próximos 40 años, lo que requiere que la producción de cemento aumentase un 25% de cara al 2030 (Rodgers, 2018).

Además de los altos niveles de emisiones de CO₂, la industria del cemento requiere de un consumo de energía alto para llevar a cabo los procesos de fabricación y de la explotación de canteras naturales para conseguir los áridos del hormigón.

2.1.3 Cementos menos contaminantes. Tendencias actuales.

Sin embargo, la industria busca realizar cambios para poder continuar con los niveles de producción actuales a través de sistemas más amigables con el ambiente, entre estos se encuentran:



- La adición al hormigón (“ashcrete”) de cenizas volantes, las cuales son un residuo o subproducto de los procesos de obtención de energía ya sea de los quemadores utilizados en las centrales eléctricas o con procesos de auto generación de energía que consumen carbón y que, de no utilizarse, se desecharía, en vertederos y que contaminarían el entorno. Es importante destacar que la incorporación de cenizas volantes mejora significativamente las propiedades mecánicas del hormigón. Asimismo, contribuye a refinar la matriz porosa del material, lo que resulta en una mezcla más cohesiva y plástica, facilitando su manejo. Además, la presencia de cenizas reduce la liberación de calor durante la reacción exotérmica de hidratación del hormigón. Esto ayuda a controlar la exudación excesiva y disminuye los cambios volumétricos que pueden provocar retracción y fisuración en la estructura del hormigón.
- Otra estrategia dirigida hacia la sostenibilidad en el sector consiste en la sustitución parcial de una fracción de los áridos finos o arena por polietileno tereftalato (PET) o productos reciclados derivados de residuos de construcción. Estos materiales, los cuales son polímeros termoplásticos de condensación, se utilizan ampliamente en la fabricación de diversos productos, siendo los envases de bebidas los más comunes. En el contexto de la construcción, se propone sustituir un porcentaje máximo del 0,5% al 10% de los áridos finos por PET o productos reciclados, como parte de esta iniciativa de sostenibilidad. (*Carreño Cornejo, F. (2020)*).
- Los hormigones con adiciones de cáñamo, conocidos como "hempcrete", se presentan como una opción ambientalmente amigable y biodegradable en la construcción. Este material se obtiene mediante la mezcla de fibras naturales de cáñamo con cal y agua, generando una sustancia similar al hormigón, pero más liviana y resistente. Cabe destacar que la cal utilizada en esta mezcla contamina un 80% menos que el cemento tradicional, lo que implica que el hormigón de cáñamo tiene un impacto carbono negativo. En otras palabras, este material es capaz de capturar más dióxido de carbono del que emite, contribuyendo así a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. (*Darío Pescador, 2022*). Cabe destacar también que estudios previos han demostrado que este hormigón presenta resistencias mecánicas y



ductilidad aceptables con la adición de pequeños porcentajes del orden del 1,5%, aumentando la resistencia a compresión en hormigones convencionales y pavimentos rígidos (*Bejarano, WV y Velásquez, WV (2020)*),

La industria cementera se plantea el desafío de cumplir con los compromisos del Pacto de París, que establece la meta de alcanzar cero emisiones para el año 2050. Con el fin de lograr la anhelada neutralidad climática, se están buscando alternativas a la fabricación de cementos y hormigones tradicionales.

En este sentido, desde hace varios años se ha venido impulsando el uso de adiciones como sustitutos del cemento Portland en las mezclas de hormigón. Estas adiciones son materiales de carácter puzolánico, así como subproductos provenientes de otras industrias. Normalmente, se utilizan en proporciones reducidas para mejorar ciertas propiedades o conferir características específicas a los hormigones. Sin embargo, el objetivo es diseñar hormigones que se basen principalmente en estas adiciones, es decir, eco sostenibles. Al ser principalmente subproductos o desechos de otras industrias, como escorias y cenizas volantes, no generan el mismo consumo de recursos ni emisiones contaminantes que el cemento Portland durante su fabricación.

En la actualidad, el diseño y estudio de estas mezclas es objeto de investigación tanto en el ámbito académico como en la industria de la construcción, con el objetivo de encontrar dosificaciones y propiedades óptimas para estas mezclas.

Es cada vez más común encontrar en el mercado cementos clasificados como ecológicos, desarrollados por las empresas cementeras, que presentan bajas emisiones de carbono durante su fabricación y reemplazan una cantidad considerable de clinker con otras adiciones. De esta manera, la industria de la construcción continúa trabajando en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan un uso sostenible del cemento, con la visión de alcanzar cero emisiones para el año 2050 mediante el uso de estas adiciones.



2.2 Cementos eco sostenibles.

El primer paso hacia la consecución de morteros y hormigones eco sostenibles consiste en asegurar que los cementos empleados en su elaboración también lo sean. Es bien sabido que el empleo de cemento genera una contaminación considerable en comparación con el consumo de recursos naturales asociados a los áridos, tanto gruesos como finos.

La fabricación de cemento conlleva una explotación intensiva de recursos naturales, tales como canteras de arcillas y calizas, además de un elevado consumo de agua, combustibles fósiles y energía, lo que resulta en altas emisiones de contaminantes hacia la atmósfera.

Sin embargo, como ya se mencionó previamente, la industria del cemento se encuentra en la búsqueda de alternativas y soluciones amigables con el medio ambiente para abordar este problema. Se están desarrollando técnicas y cementos que reduzcan significativamente las repercusiones ambientales; entre ellas, el uso de energías alternativas en la fabricación del clinker y el diseño de mezclas con bajas emisiones de carbono hacia la atmósfera. Estas iniciativas buscan promover la sostenibilidad en el sector y contribuir a la mitigación del impacto ambiental asociado a la producción de cemento.

Ejemplo de estos cementos ecológicos lo tiene la cementera mexicana CEMEX, con su cemento y hormigón Vertua, desarrollado en 2020, en su centro de investigación y desarrollo en Suiza. El hormigón Vertua se basa en un geo polímero libre de clinker que disminuye las emisiones de carbono en un 30%-70% en comparación con un hormigón tipo CEM I. La versión Ultra (70% menos de emisiones) de este producto se puede introducir en un programa de cero emisiones, el cual contrarresta el 30% de las emisiones restantes con un certificado de compensación de carbono. Con este cemento la cementera apoya a proyectos que reducen el CO₂ de la atmósfera. De esta manera certifican que por cada tonelada de CO₂ generada con el hormigón Vertua versión Ultra, una tonelada es disminuida con los proyectos de Natural Capital



Partners. De momento este proyecto se encuentra activo solamente en algunos países como Reino Unido, donde es posible certificar estas compensaciones.

El producto Vertua también se encuentra en forma de cemento, sin embargo, para esta gama la reducción de CO₂ es menor de un 15-40%, lo que nos indicaría que la principal disminución de CO₂ se da en los otros componentes del hormigón. Igualmente, el uso de estos productos se encuentra limitado a algunas aplicaciones, las cuales tienen que ser previamente valoradas por la cementera para indicar si es posible el uso de estos hormigones dentro del proyecto (*CEMEX, 2022*)

En Europa, Lafarge Holcim desarrolló una línea de hormigones que también reducen entre el 30-70% de las emisiones de CO₂ en su proceso de fabricación en comparativa con un hormigón tradicional con CEM I. Esta gama es denominada ECO Pact, cuenta con Declaración Ambiental de Producto, documento de referencia sobre el comportamiento medioambiental de un producto, esencial para una edificación verde y que facilita el acceso a las certificaciones LEED y BREEAM (*Lafarge Holcim, 2022*)

En España, la empresa Cementos Tudela Veguín S.A. se dedica a la comercialización de diversos productos cementicios ecológicos. La mayoría de estos productos incorporan escorias de alto horno como adición. Esta elección se debe a la abundancia de este tipo de adiciones en Asturias, donde se encuentran numerosas industrias siderúrgicas. De esta manera, estos cementos se presentan como una alternativa viable y verdaderamente sostenible, ya que aprovechan los subproductos de la industria local para mejorar las mezclas. Esto no solo evita los costos asociados al transporte de materiales, sino que también posiciona a estos cementos de una forma privilegiada para los consumidores que desean optar por un cemento ecológico disponible en el mercado.



2.2.1 Cementos ecológicos comerciales.

La empresa española Tudela Veguin S.A., dedicada a la producción de cementos y cales, fue fundada en 1898 y tiene su sede en la comunidad autónoma de Asturias. Es considerada una de las empresas pioneras en el sector y ha logrado establecerse como un referente a nivel internacional. La compañía se destaca por su compromiso con el medio ambiente y su enfoque en la innovación de sus procesos de producción.

Tudela Veguin S.A. cuenta con una presencia significativa en tres comunidades autónomas: Asturias, Galicia y Castilla y León, donde opera grandes fábricas que abastecen gran parte del país. Una de las ventajas distintivas de esta empresa es su capacidad para aprovechar las escorias siderúrgicas generadas en los altos hornos. Esta iniciativa se inició en 1970 a través de Áridos Asturianos S.A.

Gracias a este aprovechamiento de las escorias, Tudela Veguin S.A. ha desarrollado una amplia gama de productos conocida como GAMA BIA. Esta línea integra cementos, hormigones, morteros y conglomerantes hidráulicos, ofreciendo una solución completa y diversificada en su cartera de productos. (*Cementos Tudela Veguín, 2018*).

Esta industria cumple con la visión de la Unión Europea para cementos ecológicos, cuentan con unas emisiones específicas inferiores a 498 kg CO₂/t. La producción de estos cementos evita la emisión de 145.000 t/CO₂ año, equivalente a 76.946 coches/año, o a la energía eléctrica equivalente a 172.792 hogares/año” (*Cementos Tudela Veguín, 2018*).

Dentro de la gama se encuentran tres tipos de cementos:

El cemento CEM III/A 42,5N-SRC (BFS) que destaca por su capacidad para reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 56% en comparación con un cemento CEM I de nivel medio europeo durante su etapa de producción. Este tipo de cemento es adecuado para obras en ambientes agresivos, ya que presenta resistencia a los



sulfatos. Además, se caracteriza por generar un calor de hidratación moderado, lo que ayuda a mitigar el proceso de retracción térmica. Estas propiedades se logran gracias a la incorporación de escorias de alto horno en su composición, las cuales tienen una hidratación más lenta y refinan la estructura de poros en la matriz. Este tipo de cemento es adecuado para aplicaciones de prefabricación, aunque no es recomendado para el uso en elementos pretensados.

El cemento CEM V/A (S-V) 32,5N (BFS+FA) destaca por su capacidad para reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 66% en comparación con un cemento CEM I de nivel medio europeo durante su etapa de producción. Este tipo de cemento es adecuado para su uso en morteros en trabajos de albañilería, estabilización de suelos, firmes de hormigón y hormigones en masa, debido a su resistencia. Al igual que el cemento BFS, presenta un moderado calor de hidratación gracias a la presencia de adiciones puzolánicamente activas, como las escorias de alto horno y las cenizas volantes. Sin embargo, no se recomienda su uso en hormigones pretensados.

El cemento CEM III/B 32,5N-SR se caracteriza por su capacidad para reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 74% en comparación con un cemento CEM I de nivel medio europeo durante su etapa de producción. Este tipo de cemento es resistente a los cloruros, lo que lo hace adecuado para su uso en obras expuestas a ambientes y medios agresivos. Gracias a la inclusión de adiciones en su composición, presenta un moderado calor de hidratación, lo cual ayuda a minimizar la retracción térmica. Sin embargo, no se recomienda su uso en hormigones pretensados.

2.3 Cementos con adiciones.

El actual (*Código Estructural (2021)*), contempla únicamente el uso de cenizas volantes y humo de sílice como adiciones al hormigón durante su proceso de fabricación.



No obstante, es posible emplear escorias granuladas molidas de alto horno como adición al hormigón, siempre y cuando se cumplan las especificaciones establecidas para ello. Esto implica considerar las características mecánicas y la durabilidad en el ambiente donde se ubicará la estructura.

En general, se permite el uso de adiciones siempre y cuando se justifique su empleo mediante un estudio previo. Además, estas adiciones no deben alterar negativamente las características del hormigón ni representar un riesgo para su durabilidad o corrosión de las armaduras. El objetivo de incorporar adiciones es reemplazar parte del cemento convencional con un material que genere reacciones similares pero que otorgue propiedades distintas al hormigón, al mismo tiempo que se busca lograr un proceso de obtención más sostenible.

En el caso de estructuras de hormigón pretensado no se permite que la adición de ceniza volante exceda el 20% del peso del cemento, mientras que el humo de sílice no debe superar el 10%. Sin embargo, se permite combinar ambas adiciones en hormigones de alta resistencia fabricados con cemento tipo CEM I, siempre y cuando el contenido de humo de sílice no supere el 10% y el total de adiciones no exceda el 20% en relación al peso del cemento.

Para elementos no pretensados el límite máximo de cenizas volantes es del 35% y el del humo de sílice es del 10% en relación al peso del cemento.

Los cementos con escorias de alto horno se clasifican como CEM III y se caracterizan por tener bajo calor de hidratación y baja resistencia inicial, lo que limita su uso en la construcción a aplicaciones específicas y especiales. El rango de adiciones de escorias varía entre el 36% y el 95%.

Estos cementos se encuentran subclasificados según el contenido de clinker y adición que poseen, y se encuentran contemplados en la norma (UNE-EN197-1, 2011). La Tabla 1 muestra las clasificaciones y proporciones correspondientes.

Por otro lado, los cementos CEM V son cementos con adiciones compuestas, lo que implica que sustituyen el contenido de clinker con más de una adición, siendo una de ellas necesariamente escoria de alto horno. Estos cementos contienen entre un 40%



y un 64% de clinker, entre un 18% y un 30% de escoria de alto horno, y entre un 18% y un 30% de cenizas volantes o puzolanas naturales.

Tabla 1 Clasificación de los cementos y sus componentes según la norma UNE-EN 197-1:2011.

Tipos principales	Designación y denominación de los 27 productos (tipos de cementos comunes)		Composición (proporción en masa ^a)										Componentes minoritarios adicionales
			Componentes principales									Caliza	
			Clinker	Escoria de horno alto	Humo de sílice	Puzolana		Ceniza volante		Esquisto calcinado			
						natural	natural calcinada	silíceas	calcáreas				
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL				
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con esquisto calcinado	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cemento Portland compuesto ^c	CEM II/A-M	80-88	12-20									0-5
CEM II/B-M		65-79	21-35									0-5	
CEM III	Cemento de horno alto	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico ^c	CEM IV/A	65-89	-	11-35				-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55				-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento compuesto ^c	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49		-	-	-	-	0-5	

^a Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales.

^b La proporción de humo de sílice está limitada al 10%.

^c En los cementos Portland compuestos CEM II/A-M y CEM II/B-M, en los cementos puzolánicos CEM IV/A y CEM IV/B y en los cementos compuestos CEM V/A y CEM V/B, los componentes principales diferentes del clinker se deben declarar en la designación del cemento.



2.3.1. Escorias de alto horno.

Las escorias de alto horno (BFS, por sus siglas en inglés) constituyen un subproducto de la industria siderúrgica integral y se generan en el proceso de obtención del arrabio, que es una materia prima fundamental en la fabricación del acero.

En España, la producción principal de escorias se concentra en Asturias y se utilizan principalmente en la industria cementera. Sin embargo, debido a la producción y a los costes relacionados con el transporte, su uso se limita principalmente a esta región, lo que requiere la importación de escorias para su uso en el cemento en otras partes del país.

Las propiedades y composición de las escorias dependen de los minerales de hierro, las cenizas del coque y los óxidos fundentes utilizados durante su fabricación. Presentan una regularidad bastante constante en sus propiedades y los componentes principales incluyen CaO , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , S, FeO , MnO y K_2O .

Este material posee una alta porosidad, lo que reduce su resistencia mecánica cuando se utiliza por sí solo. Asimismo, puede presentar inestabilidad volumétrica debido al bisilicato de calcio, lo que puede provocar un aumento de volumen del 10%. Además, puede haber inestabilidad causada por la reacción de los compuestos de hierro. Aunque estos últimos no se encuentran en grandes cantidades, su presencia en exceso podría ocasionar problemas de expansividad en el hormigón.

El comportamiento de las escorias dentro de la matriz de hormigón, ya sea utilizadas solas o en combinación con otras adiciones, ha sido objeto de estudio. Se ha demostrado que las escorias generan silicato cálcico hidratado (CSH) como producto principal durante el proceso de hidratación, similar al producido por el cemento convencional (CEM I). Sin embargo, debido a su baja velocidad de hidratación, se observa una reducción en la resistencia a edades tempranas, aunque esta disminución se estabiliza con el tiempo, llegando incluso a superar las resistencias de los cementos sin adiciones en edades más avanzadas. (Díaz, *et al*, 2013).



Las BFS reducen la permeabilidad y difusión de cloruros en los hormigones, pero uno de los principales problemas que presentan es su baja resistencia frente a carbonatación. (Kim, et al,2020) menciona que la relación de calcio/silicio (Ca/Si) disminuye dentro de CSH (silicato cálcico hidratado) a medida que se aumenta la cantidad de BFS dentro del hormigón, afectando esta relación a las propiedades cementosas del material, generando una baja resistencia a la carbonatación en un ambiente acelerado.

2.3.2. Cenizas volantes (“ashcrete”).

Las cenizas volantes (FA, por sus siglas en inglés) constituyen un subproducto sólido generado durante los procesos de generación de energía, ya sea en quemadores de centrales eléctricas o en procesos de auto generación de energía que utilizan carbón como combustible. Estas cenizas son obtenidas mediante métodos de precipitación electrostática o captación mecánica de los polvos presentes en los gases de combustión de estas instalaciones (CEDEX, 2011). Tienen una granulometría homogénea, con partículas en forma de granos y una finura similar a la del cemento Portland.

Además, las cenizas volantes contienen aluminosilicatos que, al mezclarse con un activador alcalino como el hidróxido de sodio, dan lugar a precipitados de aluminosilicatos de sodio hidratado (Gel NASH). Esto permite su utilización como un aglomerante alternativo en hormigones y morteros convencionales de cemento Portland, con un porcentaje reducido de incorporación.

Estas características hacen de las cenizas volantes una opción a considerar en la fabricación de materiales de construcción, ya que pueden reemplazar parcialmente el cemento Portland en estas mezclas, contribuyendo así a la reducción de emisiones de CO₂ y ofreciendo una alternativa más sostenible en la industria de la construcción.

El hormigón con adición de estas cenizas es llamado “ashcrete” en inglés por la contracción de “ash” (ceniza) y “concrete” (hormigón). La adición de cenizas mejora



las propiedades mecánicas del hormigón al refinar la matriz porosa del mismo; mejoran también la manejabilidad al hacer la mezcla más cohesiva y plástica; reduce el calor de la reacción exotérmica de hidratación del hormigón, limita el exceso de exudación y reduce considerablemente los cambios volumétricos que general la retracción y la fisuración. (*Díaz-Hernández, D. Z. & Sarmiento-Alipio, J. A 2020*).

Se trata de un subproducto o desecho que, de no ser aprovechado, se vería destinado a los vertederos, generando contaminación en el entorno. Es importante tener en cuenta que aproximadamente el 30% del carbón utilizado en la producción de energía finaliza como residuo, convirtiéndose en el componente de mayor volumen dentro de los subproductos industriales. No obstante, al utilizar y gestionar adecuadamente este subproducto, se logra prolongar la vida útil de los vertederos, evitando su saturación prematura y sus impactos negativos en el medio ambiente.

Actualmente el principal uso de este subproducto se da en la industria cementera, utilizando el 93% de este residuo: adición al hormigón (27,8 %), materia prima de cementos (25,9 %), construcción de carreteras (23,4 %) y cementos mezclados (11,3 %), entre otros (*Molina Bas, O.I.,2008*).

2.3.3. Cementos con adiciones de ceniza de cascara de arroz.

La cáscara de arroz es un residuo ampliamente presente en la producción agrícola de granos, representando aproximadamente el 20% de la producción mundial de arroz. Actualmente, su destino final suele ser la disposición en rellenos sanitarios, lo cual constituye uno de los principales desafíos en los países productores de arroz.

Sin embargo, la quema controlada de este residuo genera una ceniza con un alto contenido de sílice, lo cual la convierte en una alternativa potencialmente interesante para su aplicación en la industria de la construcción. Esta ceniza posee propiedades puzolánicas y su disponibilidad es abundante en todo el mundo (*Chopra, D. y Siddique, R., 2015*).



La ceniza de cáscara de arroz proporciona sílice en forma amorfa, la cual puede actuar como una puzolana. Esta sustancia participa en la formación de fases mineralógicas como los silicatos tricálcicos y bicálcicos (C_3S y C_2S) presentes en el cemento. Al reaccionar con la cal, se generan cristales de silicato de calcio hidratado (CHS), contribuyendo así al desarrollo de propiedades mecánicas en los hormigones que la incorporan (Kishore, R., Bhikshma, V. y Prakash, PJ, 2011).

Por esta razón, se considera que este material es una opción viable para la sustitución parcial del cemento en elementos constructivos, como los bloques de hormigón, tanto desde una perspectiva mecánica como económica. Además, debido a que este residuo carece de valor comercial en la actualidad, excepto por su uso en el proceso de secado del grano de arroz mediante la captura del calor generado durante su combustión, se destaca su potencial de aprovechamiento en la industria de la construcción.

2.3.4. Cementos con filler calizo.

El cemento con filler calizo se ha estudiado a lo largo de los años, ubicándose como una solución viable para mitigar las emisiones de CO_2 producidas por la producción de cemento CEM I, ya que produce un considerable ahorro de energía, recursos naturales, y por ende una importante reducción de la contaminación ambiental, sin afectar las propiedades tecnológicas de los cementos (Bonavetti, V. L. (1998).

El filler produce un incremento de la hidratación temprana debido al efecto físico (relleno y nucleación heterogénea), además reacciona lentamente, provoca el refinamiento de granos y poros, mejora las propiedades mecánicas y durables (Irassar et al. 2015) y de forma general se considera un acelerador de la velocidad de hidratación del cemento Portland. Es considerado el precursor del LC3 en cuestiones comparativas.



2.3.5. Cementos bajos en carbono. (LC3)

Los cementos bajos en carbono, también conocidos como LC3 (Limestone Calcined Clay Cement), son una innovadora alternativa al cemento tradicional (CEM I) que busca reducir significativamente las emisiones de CO₂ asociadas a la producción del clinker, no del cemento. Cemento = clinker + yeso. La contaminación viene del tratamiento térmico de clinkerización para obtenerlo, en la calcinación de la caliza (carbonato cálcico) se desprende mucho CO₂ y de la quema del combustible para lograr el proceso 1450-1500°C. El LC3 se compone principalmente de tres ingredientes clave: cemento, caliza o filler calizo y arcilla calcinada.

La caliza se utiliza como fuente de óxido de calcio, mientras que la arcilla calcinada aporta sílice, alúmina y otras fases minerales como Fe₂O₃. Estos materiales dan lugar a los silicatos cálcicos y aluminatos cálcicos (y ferroaluminatos cálcicos) que son las fases que forman el clinker y que cuando son amasadas con agua dan lugar a sólidos hidratados consecuencia de las reacciones de hidratación y permiten que el material fragüe y endurezca permaneciendo estable incluso bajo el agua. Los cementos pueden ser combinados con adiciones puzolánicas para mejorar las propiedades mecánicas del cemento para formar gel C-S-H secundario con consumo de portlandita.

El proceso de producción del LC3 implica la calcinación de la arcilla a temperaturas más bajas en comparación con la fabricación del cemento convencional. Esto conlleva una reducción significativa en las emisiones de CO₂, ya que se requiere menos energía para su calcinación y que una parte importante del contenido de cemento es reducida (la obtención del clinker es lo que da lugar a las emisiones del CO₂, no lo que es el cemento, sino el clinker).

Estos cementos, constituyen la última línea de investigación dedicada a la reducción de la huella de carbono y a la reducción también del consumo de energía, manteniendo intactas las propiedades mecánicas y de durabilidad, motivo por el cual se presenta como alternativa al cemento Portland.



La principal innovación de esta nueva propuesta de cemento, es sustituir el clinker, por la combinación de la arcilla de caolinita (30%), disponible en abundancia, con un 15% adicional de piedra caliza, que juntos tienen un efecto sinérgico y reductor de emisiones CO₂.

Cabe destacar que no cualquier tipo de arcilla es idónea para ser calcinada y producir LC3, siendo recomendada por sus propiedades puzolánicas adquiridas al ser calcinado, el metacaolín.

Para su producción se emplea piedra caliza (15%), arcilla calcinada (30%) y yeso (5%), a modo de sustituto parcial del clinker de cemento Portland, y un 50% en masa del cemento CEM I, lo que permite reducir un 40% las emisiones de CO₂ durante la producción del material como se muestra en la Figura 6. Cabe destacar que según (Scrivener et al. 2019), desde el año 1970, Brasil está usando cemento hecho de clinker con adiciones de arcillas calcinadas.

La durabilidad es un tema que puede verse comprometida con la reducción de clinker, ya que la portlandita reduce su presencia y no existirían reservas básicas suficientes para hacer frente a procesos patológicos (carbonatación da lugar a la reducción de portlandita comprometiendo el valor de pH (13) con el cual la capa pasiva de óxidos e hidróxidos de hierro que recubren la armadura de acero es estable. Por otra parte, con la porosidad refinada (porosidad capilar) producida por el efecto puzolánico del metacaolín debido a que la alúmina presente en el metacaolín reacciona con la piedra caliza molida, se garantiza un avance más lento de agentes como cloruros y sulfatos. La macroporosidad es la que condiciona las propiedades mecánicas.

En la Tabla 2, se hace una comparación entre las dos líneas de investigación más recientes y con mejores resultados, frente al cemento Portland CEM I, evidenciándose sus beneficios.

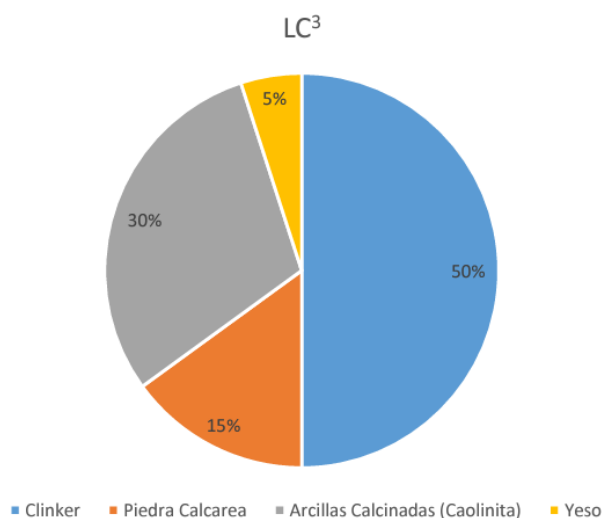


Figura 6. Porciones de materiales para la fabricación de LC3. (Echeverría Santos, C. M. (2022)).

Tabla 2. Comparación entre cemento portland CEM 1, Filler calizo y LC3. (Echeverría Santos, C. M. (2022)).

Tipo de Cemento	Temp. Promedio de Fusión (°C)	Porción en Masa (Reemplazo de clinker)	Resistencia Mecánica (28 días) (MPa)	Emisiones de CO ₂ (kg/ T de Cemento)	Reducción de emisiones de CO ₂ (%)
Portland (Tipo - I)	1350 - 1450	5%	52	745	0%
Cemento con Filler Calizo	1100 - 1200	21 – 35%	40 (con 15% de reemplazo)	627	26%
LC ³	600 - 800	50%	63 (con 30% de arcilla calcinada)	450	40%

El desarrollo y la adopción de los cementos bajos en carbono, como el LC3, representan un importante avance hacia la sostenibilidad en la industria de la construcción, ya que contribuyen a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de cemento (en concreto en la producc



3. OBJETIVO PRINCIPAL

Conseguir la sustitución parcial del cemento portland por otros materiales más sostenibles (de elevada disponibilidad geográfica), en la elaboración de morteros para las obras civiles y la edificación con buen comportamiento durable frente a agentes agresivos y sin comprometer las propiedades mecánicas.

3.1 OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Caracterizar las arcillas y analizar su reactividad frente al hidróxido cálcico (puzolanidad) ante su posible uso como componente de pastas y morteros en sustitución del cemento Portland
- Analizar el comportamiento mecánico de morteros sostenibles con reducción de cemento realizados con arcillas calcinadas y comparar los resultados con morteros tradicionales.
- Estudiar la durabilidad de morteros arcillas calcinadas en sustitución parcial del cemento Portland.



4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.

En esta campaña se buscó promover la sustitución parcial del cemento Portland CEM I-42,5R por porcentajes de arcillas calcinadas en morteros, con el objetivo de hacer más sostenible la industria de la construcción.

Los materiales utilizados en esta iniciativa incluyeron cemento Portland CEM I-42,5R, arcillas calcinadas, arena normalizada, metacaolín, filler calizo, superplastificante, agua destilada y agua potable.

Esta estrategia tuvo como propósito reducir el impacto ambiental asociado a la producción de cemento y fomentar el uso de materiales alternativos más sostenibles en la construcción.

4.1. Materiales utilizados. Proceso de fabricación de las muestras.

A continuación se describen los materiales utilizados dentro del trabajo, así como el proceso de elaboración de las probetas utilizadas en los ensayos de caracterización mecánica y durabilidad.

4.1.1 Materiales utilizados.

Los materiales usados en la campaña experimental, que posteriormente se detallan, son:

- ✓ Cemento de referencia (CEM I-42,5R), procedente de la cementera asturiana Tudela Veguín. España.
- ✓ Arcillas Calcinadas, facilitadas por la empresa Tolsa, una prestigiosa empresa líder en la extracción, el tratamiento y la comercialización de soluciones minerales en España. Filler calizo Omyacaba 10- BE, procedente de la empresa Omya Clariana SA de Zaragoza. España.
- ✓ Metacaolín Berkbent Cimax, procedente de Argentina, pertenece a la cartera de productos de Tolsa.
- ✓ Arena normalizada CEN Normsand DIN EN 196-1, procedente de Alemania, de naturaleza carboxilato. Presentación bolsas de 1350 ± 5 g.

- ✓ Superplastificante Sika® ViscoCrete®-6003 NG, recomendado por el fabricante para este estudio dentro de su amplia gama de productos.
- ✓ Agua proviene la red de abastecimiento del ayuntamiento de Madrid, suministrada por el Canal de Isabel II.
- ✓ Agua Destilada, proviene del laboratorio de química de la ETSICCP, marca Merck.

4.1.1.1. Cemento de Referencia.(CEM I 42,5 R) .

El cemento utilizado, para todos los morteros y pastas de este trabajo, tanto en la realización de probetas de referencia como probetas de morteros y pastas con adiciones de arcillas; fue el cemento comercial CEM I 42,5 R.

Este cemento de origen asturiano es apto para hormigones armados y pretensados que requieren de resistencias mecánicas altas; descimbrados y desencofrados a edades muy tempranas y prefabricados de altas resistencias mecánicas. Cumple con la norma (UNE-EN-197-1, 2011). Se muestra en Figura 7.

El cemento de referencia utilizado, fue caracterizado por ensayo de fluorescencia de rayos X y sus componentes fueron los indicados en la Tabla 3:

Tabla 3. Composición química cemento tipo I 42.5.

Componente	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MnO	SO ₃
%	63,5	2,63	0,86	1,9	0,11	20	0,2	4,51	0,11	0,08	3



Figura 7. Cemento CEM I 42,5 R. Modalidad a granel. (Cementos Tudela, (2018))

4.1.1.2 Árido fino.

Para las amasadas de los morteros se utilizó arena de sílice normalizada, que cumple con las características descritas en el (Código Estructural (2021)), y en la norma DIN-EN 196-1.

Es una arena de origen alemán, medida y normalizada para ensayos de laboratorio con un contenido de 1350 ± 5 g por funda. En la Figura 8 se puede ver una saco que contiene 38 bolsas y una bolsa de arena.



Figura 8. Arena normalizada. (Fotografías propias)

4.1.1.3 Metacaolín.

Se utilizó el metacaolín Berkbent Cimax de Tolsa, el cual es un aluminio silicato cementante de procedencia Argentina. Su composición química es la que se indica en la Tabla 4 y cuya presentación comercial se puede ver en la Figura 9.

Es cementante porque es hidráulico y puzolánico. Reacción puzolánica : arcilla calcinada + portlandita + H₂O = gel C-S-H secundario. Se forma gel responsable de propiedades mecánicas pero se consume portlandita.

Tabla 4. Composición Química metacaolín Tolsa en porcentajes.

Prototipo	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O ₃	K ₂ O	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	PPC
CIMAX	47,63	29,81	1,64	1,61	3,2	0,34	0,27	0,027	1,663	13,4



Figura 9. Presentación comercial metacaolín Tolsa. (Fotografías propias).

4.1.1.4 Filler Calizo.

Filler calizo empleado en este estudio fue el Omyacaba 10- BE , presenta 2700 kg/m^3 de densidad, con superficie Blaine entre 400 y 450 m^2/kg . En la Figura 10 se presenta un saco del filler empleado.



Figura 10. Presentación comercial filler calizo. (Fotografías propias).

4.1.1.5 Arcillas Calcinadas.

Para la realización del presente estudio se trabajó con dos tipologías de arcillas, ambas provenientes de la empresa Tolsa:

- ✓ **Arcilla 1A**, es una arcilla de tipo fibrilar calcinada.
- ✓ **Arcilla 5TC**, es una arcilla de tipo laminar calcinada.

En la Figura 11 se pueden ver los dos tipos de arcillas y en la Tabla 5 se indican las características principales y composición química de las mismas.



Figura 11. Muestras arcillas 1A y 5TC. (Fotografías propias).

Tabla 5. Análisis químico arcillas 1A y 5TC.

Prototipo(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O ₃	K ₂ O	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	PPC
Arcilla 1A	55,68	4,16	10,95	9,42	2,39	0,06	0,23	0,009	0,182	16,3
Arcilla 5TC	56,99	20	3,48	1,43	7,93	1,6	1,3	0,137	0,502	5,7

4.1.1.6 Superplastificante.

Se utilizó el superplastificante Sika® ViscoCrete®-6003 NG, por recomendación del fabricante, en vista de la absorción de agua de algunas arcillas, debido a su superficie específica.

En la Figura 12 se puede ver la presentación comercial del superplastificante.



Figura 12. Super plastificante ViscoCrete - 6003 NG. De izquierda a derecha, (Fotografía propia), (fotográfica catálogo Sika)

4.1.1.7 Agua de abastecimiento del ayuntamiento de Madrid.

Proveniente del canal de Isabel II. Ciudad Madrid. Para amasado de morteros

4.1.1.8 Agua destilada.

Se muestra el equipo de destilación marca Merck, en el laboratorio de química de la ETSICCP , en la Figura 13. Para amasado de pastas.



Figura 13. Equipo de destilación. (Fotografías propias).

4.1.2 Dosificaciones.

Los morteros y pastas utilizados en esta campaña experimental, fueron elaborados con una cantidad total de sólidos de 450 g. Dentro de los sólidos tenemos cemento, arcillas, filler calizo y metacaolín, excepto en el de referencia, compuesto solamente cemento.

Esta proporción se mantuvo tanto para propiedades mecánicas y durabilidad, con base en los morteros, como para pastas en la realización de los ATD. La relación agua / cemento utilizada para pastas fue de 0,35 y 0,5 para morteros.

En las Tablas 6 y 7 se muestran las dosificaciones de morteros y pastas respectivamente.

Tabla 6 Dosificación Morteros con arcilla calcinada.

		Morteros		
Materiales	%	Ref.(gr.)	A1 (gr.)	A5 (gr.)
Cemento	55	450	248	248
Filler Calizo	15		68	68
Arcilla	18		81	81
Metacaolin	12		54	54
Agua	a/c =0,5	225	225	225
Arena		1350	1350	1350

Tabla 7 Dosificación Pastas con arcilla calcinada.

		Pastas		
Materiales	%	Ref.(gr.)	A1 (gr.)	A5 (gr.)
Cemento	55	450	248	248
Filler Calizo	15		68	68
Arcilla	18		81	81
Metacaolin	12		54	54
Agua	a/c =0,35	157,5	225	157,5

4.1.3 Proceso de amasado de las muestras. Morteros y Pastas.

Las muestras de morteros se amasaron en una amasadora automática para morteros de eje vertical con capacidad de aproximadamente 5 litros conforme lo establecido en la norma (UNE-EN 196-1, 2018).

En el caso de los morteros, el proceso se inició colocando primero el agua en la jarra, posteriormente los sólidos (cemento CEM I 42,5 R + filler+ metacaolin+ arcilla) , se amasaron ambos durante 30 segundos a velocidad lenta, posteriormente se vertió la arena durante 30 segundos también a velocidad lenta, 30 segundos de amasada a velocidad rápida, después hizo una pausa el amasado 90 segundos, se terminó con 60 segundos de amasado a velocidad rápida.

La mezcla obtenida de este proceso se colocó en los moldes, previamente untados con desencofrante, hasta llenar la mitad del molde, se le aplicaron dos tandas de 60 golpes, la primera después de rellenar medio molde y una tanda final después de rellenar por completo el molde si son probetas prismáticas de 4x4x16cm³ o 2 tandas de 20 segundos en la mesa vibradora si son probetas cilíndricas de Ø 10x20 cm³, una

primera tanda despues de rellenar la mitad del molde y otra tanda al final. Posteriormente se rellenó el resto del molde para aplicar otros 60 golpes o 20 segundos en le mesa vibradora. Todo este procedimiento cumpliendo con la (UNE-EN 196-1, 2018).

En el caso de las pastas, el proceso fue similar; se coloca el agua y la mezcla de sólidos en la jarra de amasado, se programan 90 segundo de amasado lento, 30 segundos de reposo y 90 segundos de amasado lento hasta finalizar. Una vez terminado este proceso se colocó en los moldes de 1x1x6cm³ para pasta, previamente untados con desencofrante, hasta llenar a la mitad, se aplicaron 60 golpes en la máquina compactadora , posteriormente se llenó el resto del molde y se aplicaron otros 60 golpes. En la Figura 14 se muestran los moldes de las probetas prismáticas (ensayos de flexo-tracción y compresión) y cilíndricas (ensayos de durabilidad) y en la Figura 15 se muestra la dosificación de material, la mesa de vibrado y el molde para probetas de pastas.



Figura 14. De izquierda de derecha, moldes para probetas prismáticas y cilíndricas para morteros; maquina compactadora por golpes. (Fotografías propias).



Figura 15. De izquierda a derecha, material dosificado para elaborar morteros y pastas, mesa vibratoria y moldes para pastas. (Fotografías propias).

4.1.4 Fabricación y curado de probetas.

Se elaboraron dos tipos de probetas, prismáticas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ para la caracterización mecánica de los morteros, y cilíndricas de $\text{Ø}10 \times 20 \text{ cm}^3$, para los ensayos de durabilidad. En ambos casos se utilizaron los procedimientos descritos en el apartado 3.1.3 cumpliendo con lo establecido en la (UNE-EN 196-1, 2018).

Una vez rellenos los moldes de las probetas prismáticas, se cubrieron con plástico, debidamente identificadas, y se introdujeron a la cámara de curado, en donde se mantuvieron a $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, y a 98% HR $\pm 5\%$ de humedad; en el caso de las cilíndricas se cubrieron con un plástico y se mantuvieron en el ambiente del laboratorio.

Pasadas las 24 horas se procedió a desmoldar las probetas, depositando todas en la cámara de curado, en donde estuvieron por 28 días en el caso de las probetas cilíndricas para los ensayos de durabilidad, y hasta los 2, 7, 28 y 60 días, para las probetas prismáticas empleadas para los ensayos de resistencia mecánica. En la Figura 16 se muestrann los procesos anteriormente descritos.

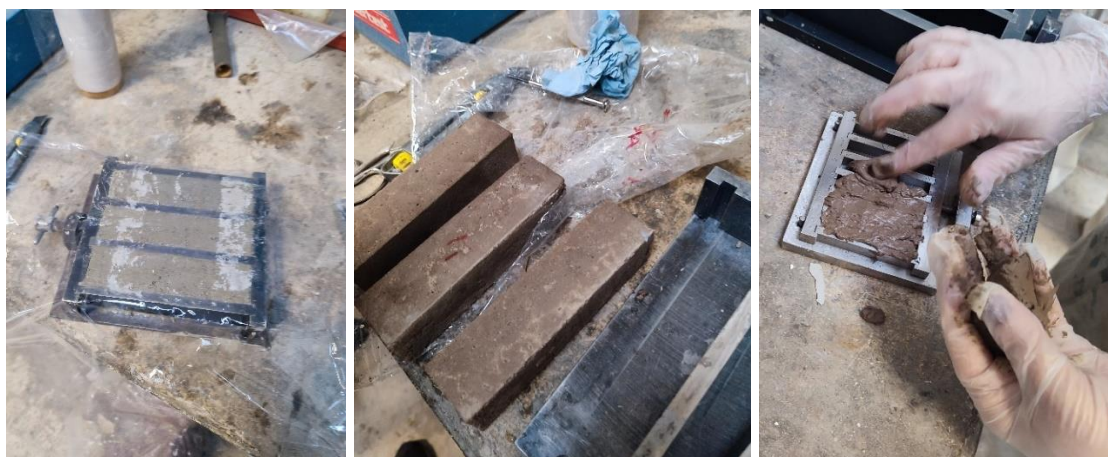


Figura 16. De izquierda a derecha, elaboración probeta prismática, desmoldado de probeta prismática y elaboración probeta prismática para pastas. (Fotografías propias).



4.2 Ensayos de laboratorio realizados.

En acápite se describe la metodología seguida para los ensayos tanto de propiedades mecánicas, como de durabilidad. De igual forma se describen los ensayos previos de caracterización de los materiales, para pastas el Análisis Térmico Diferencial (ATD) para cuantificar los productos de hidratación en pastas previo ensayo de consistencia de pasta.

Los realizados para la caracterización de los morteros y pastas con sustitución de cemento por arcillas calcinadas son:

- Ensayos para propiedades mecánicas
- Ensayos de durabilidad.

4.2.1 Ensayo de caracterización de morteros.

Se describe de forma general el proceso de caracterización de los componentes de los morteros a través del ensayo de consistencia, análisis térmico diferencial (ATD) y fraguado del morteros.

4.2.1.1 Ensayo de consistencia.

Se realizó el ensayo de consistencia a los morteros, según la normativa (UNE-EN 1015-4: 1999), para determinar los porcentajes de SP a utilizar en los morteros, según la arcilla utilizada y se corroboró con el ensayo de penetración del pistón, con la intención de que los morteros tuviesen valores de consistencias similares y del orden del mortero de referencia, el cual no tiene adiciones de superplastificante y su trabajabilidad es la óptima requerida del orden de 6 ± 2 mm, esto es para pastas.

Se definió que para morteros, en vista que no lleva superplastificante la penetración del pistón fue de 30mm. Esta medida se tomo como referencia para ajustar el contenido de SP para los diferentes morteros.

Este ensayo es utilizado para determinar la trabajabilidad y la consistencia del mortero fresco. Se basa en la medición de la resistencia del mortero a la penetración de un pistón bajo condiciones controladas.

Este ensayo se lleva a cabo utilizando un molde cilíndrico y un pistón ambos de dimensiones normadas. El molde se llena con dos capas con hormigón fresco y se compacta con 10 golpes leves cada capa, posteriormente se enrrasa y de deja caer el pistón por gravedad desde la altura que estipula la norma y se mide la penetración del mismo en el mortero.

La consistencia del mortero se determina en función de la profundidad de penetración del pistón. Cuanto mayor sea la penetración, más blando y fluido será el mortero, lo que indica una consistencia más alta. Por el contrario, si la penetración es menor, el mortero tendrá una consistencia más seca y compacta.

En resumen, el ensayo de consistencia por penetración del pistón es una técnica utilizada para evaluar la trabajabilidad y consistencia del mortero en estado fresco.

En el caso de las pastas, se utilizó la (UNE-EN 196-3: 2017) y se corroboraron los valores con el ensayo, de consistencia de pasta, siendo el procedo muy similar al anteriormente descrito para morteros.

Los equipos utilizados en ambos procedimientos, se encuentran en la Figura 17.

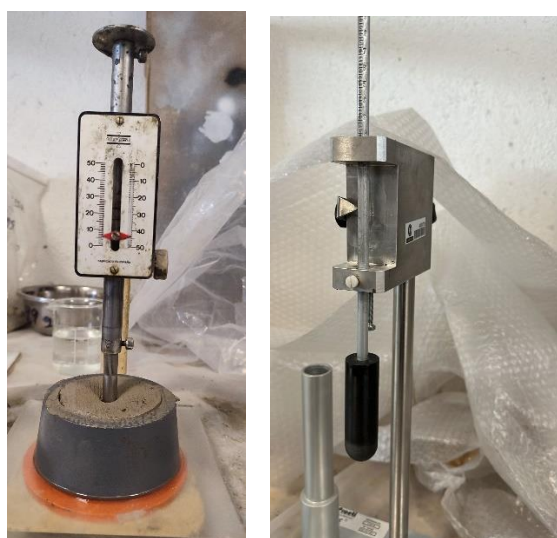


Figura 17. De izquierda a derecha, ensayo de consistencia para pastas (Aguja de Vicat) y ensayo consistencia de morteros (penetración del pistón). (Fotografías propias).



4.2.1.2 Análisis Térmico Diferencial. (ATD).

El análisis térmico diferencial es una técnica utilizada para cuantificar la cantidad de compuestos hidratados generados durante la hidratación de las pastas y cuantificarlos mediante el cálculo de la pérdida de peso en rangos de temperatura. Este proceso implica analizar el polvo obtenido de las pastas en diferentes etapas de hidratación a diferentes edades. El polvo se calienta a diferentes temperaturas, desde 45 °C hasta 1100 °C, a una velocidad de 10 °C/min en una atmósfera de nitrógeno inerte (N₂) en el entorno de los crisoles de alúmina, lo que evita la oxidación o reacciones indeseables del material durante la prueba y permite obtener mediciones precisas de los cambios térmicos que ocurren.

Durante este proceso, se mide la cantidad de agua perdida, que generalmente está relacionada y combinada con los diferentes componentes de las pastas (que serán los mismos que en los morteros). En la Figura 18 se muestra el equipo utilizado para este ensayo, incluyendo la cámara de vacío para detener la hidratación y las muestras de pasta que luego serán trituradas.

En el caso de los cementos, la primera pérdida de masa está asociada a la pérdida de agua de hidratación (45-105°C), la segunda pérdida corresponde al agua de gel de sílice en la mezcla (gel C-S-H o silicato cálcico hidratado, el tercer pico de temperatura está relacionado con la deshidroxilación de la portlandita y el cuarto pico de temperatura corresponde a la pérdida de CO₂ de los carbonatos presentes. La pérdida de portlandita ocurre generalmente en el rango de temperatura de 400 °C a 500 °C, aunque este rango puede variar según el grado de cristalinidad de la portlandita.

“La pérdida de peso por mol de agua es de 18 g, se debe a la deshidroxilación de un mol de Ca (OH)₂ (74 g)” **(Molina Bas, O.I. 2008).**

La descarbonatación suele ocurrir en un rango comprendido entre los 550°C y los 800°C., aunque puede ocurrir que parte de la portlandita se haya carbonatado, por esto es necesario ajustar estos rangos.

La deshidratación de la mayoría de compuestos hidratados de cemento se encuentra en el rango de temperaturas comprendido entre los 20 °C y 400 °C. La deshidratación

de los silicatos cálcicos hidratados se debe a la pérdida de agua presente en los poros y a su agua estructural. La pérdida total de esta agua tiene lugar cuando la muestra es calentada hasta los 400 °C aproximadamente, pero dependiendo de la temperatura el tipo de agua que se desprende es diferente a 100 °C la pérdida de masa producida corresponde a el agua libre, cercano a los 120 °C se pierde agua interlamilar y a temperaturas mayores, entre 150 °C y 350 °C, tiene lugar la deshidratación del agua unida a la estructura **(Molina Bas, O.I. 2008)**.

Así, los rangos de temperaturas comúnmente analizados en el Análisis Térmico Diferencial (ATD)-TG son:

45 °C – 105 ° C Se elimina el agua de hidratación.

105 °C - 415 ° C Deshidratación de los geles, tanto los producidos por el cemento Portland (C-S-H) de silicato cálcicos hidratados y aluminio silicatos cálcicos hidratados como los producidos por la arcilla y el metacaolín (C-(A)-S-H).

415 °C - 530 °C Deshidroxilación de la portlandita (perdida de OH⁻ como H₂O)

530 °C -1100 °C Perdidas de peso asociado a los carbonatos $\text{Ca CO}_3 - \text{C O}_2 = \text{Ca O}$

El 41% de esas pérdidas de carbonatos, corresponden a la portlandita que se ha carbonatado. (MA de la Rubia,2018)

Para el análisis de las muestras se utilizó un equipo LABSYS provisto por SETARAM Instrumentation. Se llevó a cabo el análisis de muestras a 2, 7, 28 y 60 días.



Figura 18. De izquierda a derecha, equipo LABSYS, de SETARAM Instrumentación, cámara de vacío, y probetas prismáticas de pastas (Fotografías propias).

4.2.1.3 Ensayo de fraguado o trabajabilidad de morteros.

El tiempo de fraguado se refiere al período en el cual el mortero pasa de un estado líquido a un estado sólido debido al proceso de hidratación del cemento. El tiempo de fraguado, puede variar según varios factores, como la composición del mortero, la temperatura ambiente, la cantidad y tipo de cemento utilizado, la relación agua-cemento, la presencia de aditivos y otros factores ambientales.

Para obtener este dato, se realizó según la normativa (UNE-EN 1015- 9: 2000) ,el ensayo correspondiente para estos morteros con adiciones de arcillas calcinadas.

Previo al ensayo, se realizó una amasada, con los componentes de cada mortero, tanto para la Arcilla 1A y la Arcilla 5TC. Una vez amasados, se colocaran en los moldes normalizados para realizar el ensayo, llenandose en 10 etapas y enrrasando la cara superficial. La resistencia a la penetración se mide con una sonda normalizada cada 15 minutos en puntos diferentes de la muestra como se muestra en la Figura 19 y hasta que se alcance el valor de 0.5 N/mm² establecido por la normativa.



Figura 19. Equipo para ensayo de fraguado en morteros. (Fotografías propias).



4.2.2 Propiedades mecánicas.

Existen varios ensayos para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales, incluyendo los morteros. Algunos de los ensayos comunes para medir estas propiedades son:

- Resistencia a la compresión: Este ensayo evalúa la capacidad de un material para resistir fuerzas de compresión. Se aplica una carga gradualmente al mortero endurecido y se mide la resistencia máxima que puede soportar antes de fracturarse. Se realiza utilizando una máquina de ensayo de compresión.
- Resistencia a la flexión: Este ensayo evalúa la capacidad del mortero para resistir fuerzas de flexión. Se somete una probeta de mortero a una carga que genera un momento de flexión y se mide la resistencia máxima antes de la fractura. Se realiza utilizando una máquina de ensayo de flexión.

Para estos ensayos de propiedades mecánicas se fabricaron 36 probetas prismáticas, 12 para el mortero con adición Arcilla 1A, otras 12 para el mortero con adición Arcilla 5TC y 12 para el mortero de referencia, para comprobar las características a flexotracción y a compresión, como se muestran en la Figura 20.

Es relevante destacar que todos los ensayos realizados han seguido los procedimientos establecidos en la normativa correspondiente, lo cual garantiza la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. Estos datos son fundamentales para evaluar la calidad y el desempeño del mortero en aplicaciones de construcción, así como para asegurar la seguridad y durabilidad de las estructuras.



Figura 20. Probetas prismáticas utilizadas para ensayos de propiedades mecánicas. (Fotografías propias).

4.2.2.2.1 Resistencia a flexo-tracción.

El ensayo de resistencia a flexo-tracción, también conocido como ensayo de flexión por tracción, se utiliza para evaluar la capacidad de un material, como un mortero, para resistir fuerzas de flexión combinadas con tracción. Este ensayo proporciona información sobre la resistencia y la ductilidad del material.

El ensayo de resistencia a flexo-tracción se llevó a cabo siguiendo las directrices establecidas en la norma (UNE-EN 196-1:2018). Para cada tipo de mortero, se prepararon tres probetas prismáticas y se realizaron las pruebas a los 2, 7, 28 y 90 días de edad respectivamente.

El objetivo principal de este ensayo es determinar la resistencia del mortero a la flexión aplicando una carga perpendicular a su eje longitudinal. Para lograr esto, se utilizó un equipo normalizado que aplica una fuerza de corte en tres puntos: uno en el centro de la cara lateral superior y dos en la cara inferior de la probeta.

La carga se incrementa gradualmente hasta que la probeta se rompe en dos partes, tal como se muestra en la Figura 21.

Durante el ensayo, se registró la tensión máxima necesaria para romper la probeta en cada caso. Estos resultados serán presentados posteriormente en el informe correspondiente, ya que proporcionaron información relevante sobre la resistencia a

flexo-tracción del mortero y permitieron realizar comparaciones entre diferentes tipos y edades del mismo.

Este ensayo es de gran importancia en el estudio de las propiedades mecánicas del mortero, ya que proporciona datos cuantitativos sobre su capacidad para resistir cargas de flexión. Estos resultados son de utilidad para evaluar la calidad del mortero y determinar su idoneidad para diferentes aplicaciones en la industria de la construcción.



Figura 21. Equipo de ensayo a flexo tracción. (Fotografías propias).

4.2.1.2. Resistencia a compresión.

El ensayo de compresión de morteros se lleva a cabo con el objetivo de determinar su resistencia a la compresión, que es la capacidad del mortero para soportar cargas a compresión aplicadas en dirección perpendicular a su superficie.

En este caso, los ensayos se realizaron siguiendo las especificaciones establecidas en la normativa (UNE-EN-196-1,2018). Se utilizaron las medias probetas residuales obtenidas del ensayo de flexo-tracción, ya que su integridad estructural no se ve comprometida.

Para cada edad de 2, 7 y 28 días, se utilizaron las seis mitades de las tres probetas correspondientes a cada tipo de mortero. Estas mitades se colocaron una a una en la máquina de ensayos, asegurando que las caras lisas tuvieran contacto con la prensa

y la base. Luego, se aplicó una carga de compresión distribuida en la cara superior e inferior de la probeta hasta que se produjo la rotura, registrando la fuerza requerida para ello. Procedimiento registrado en la Figura 22.

A partir de estos datos, se obtuvo la resistencia a la compresión del mortero mediante el cálculo de la relación entre la fuerza aplicada y la superficie de contacto. Estos resultados proporcionan información importante sobre la capacidad del mortero para soportar cargas en situaciones de compresión.



Figura 22. Equipo de ensayo a compresión. (Fotografías propias).

4.2.3 Ensayos de durabilidad.

Los ensayos de durabilidad en materiales de construcción, como los morteros, se realizan con el fin de evaluar su resistencia y comportamiento frente a factores ambientales adversos a lo largo del tiempo. Estos ensayos proporcionan información importante sobre la durabilidad del material y su capacidad para mantener sus propiedades y desempeño a lo largo de su vida útil.

En el caso particular de los morteros, se prepararon probetas cilíndricas utilizando moldes de $\text{Ø } 10 \times 20 \text{ cm}^3$. Se vertió todo el contenido de la jarra de amasado en los moldes, en dos capas, y se compactaron debidamente en una mesa de vibración.

Como parte del estudio, se amasaron tres probetas por cada tipo de mortero con adición de arcilla, más las tres probetas de referencia sin adición.

Posteriormente, las probetas de mortero fueron segmentadas en dos partes, obteniendo un total de seis muestras. La selección de la cantidad de muestras por ensayo, se realizó de acuerdo con los criterios específicos del estudio.

Para el ensayo de carbonatación se utilizaron dos medias probetas de 7cm, las otras dos mitades de 5cm se utilizaron en los ensayos de migración acelerada de cloruros y para el ensayo de difusión de cloruros se utilizó la última probeta, segmentada en un pedazo de 7cm y uno de 5cm. Esquema representado en la Figura 23.

Los ensayos de durabilidad permitieron evaluar la resistencia del mortero frente a condiciones ambientales adversas, como exposición a agentes químicos, ciclos de hielo-deshielo y penetración de agua. Los resultados obtenidos en estos ensayos son fundamentales para comprender el comportamiento del mortero en condiciones reales y para garantizar su durabilidad y desempeño a lo largo del tiempo.

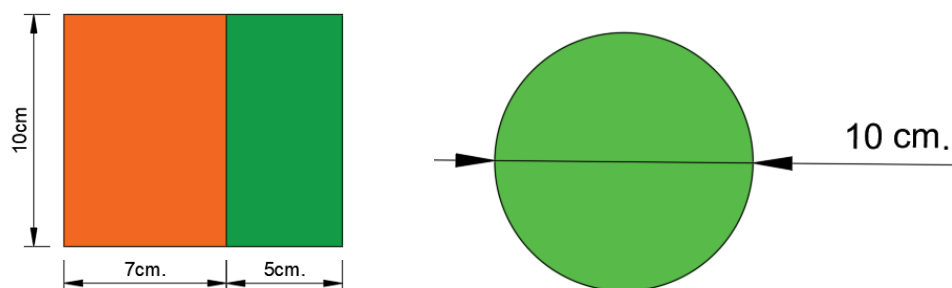


Figura 23. Seccionado de probetas para ensayos. (Esquemas propios).

4.2.3.1 Resistividad

El ensayo de resistividad en morteros está relacionado de manera cualitativa con la porosidad interconectada que presenta su matriz se utiliza para evaluar la capacidad de un mortero para hacer a la penetración de agentes agresivos, en fase acuosa como los iones cloruro o en fase gaseosa carbonatación. La resistividad eléctrica es una medida de la oposición al flujo de corriente eléctrica a través del mortero.

El equipo de medida de resistividad cuenta con dos electrodos y unas esponjas que fomentan la conductividad, primeramente, se mide la resistencia eléctrica de las esponjas a 1 KHz y posteriormente se cambia la frecuencia a 400 Hz y se colocan las probetas para ser ensayadas. La probeta se coloca de forma perpendicular a los dos electrodos encima de las esponjas conductoras como se muestra en la Figura 24.

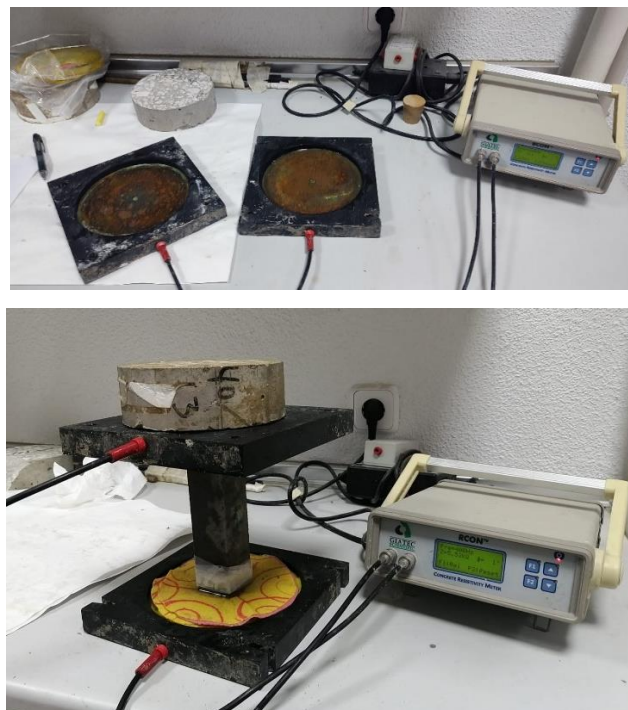


Figura 24. Equipo de medición para el ensayo de Resistividad (Fotografías propias).



Cabe destacar que es un ensayo no destructivo y que se realizó a los 2, 7, 14, 28 y 60 días, tanto a las probetas prismáticas como las cilíndricas. Las probetas se sacaron de la cámara de curado y son llevadas rápidamente para realizarle el proceso con la finalidad de que no pierdan humedad.

La resistividad eléctrica se calcula dividiendo la resistencia eléctrica medida por la sección transversal de la probeta y la distancia entre los electrodos. La resistividad se expresa generalmente en ohmios por metro ($\Omega \cdot m$) y cuanto mayor sea el valor de resistividad, mayor será la capacidad del mortero para resistir la penetración de los agentes agresivos.

El ensayo de resistividad en morteros puede proporcionar información importante sobre la durabilidad del mortero. Los valores de resistividad obtenidos se pueden comparar con criterios establecidos en normas o directrices para evaluar la calidad del mortero y tomar decisiones relacionadas con el diseño y la selección de materiales en proyectos de construcción.

Es importante seguir las normas y los procedimientos adecuados al realizar el ensayo de resistividad en morteros para obtener resultados confiables y significativos. Además, es necesario considerar que la resistividad puede verse afectada por factores como la composición del mortero, la relación agua-cemento, el contenido de humedad, la presencia de aditivos y otros parámetros relevantes que condicionan la microestructura de la matriz.

4.2.3.2 Penetración de Cloruros.

El ensayo de penetración de cloruros se utiliza para determinar la capacidad de un mortero, para resistir la penetración de iones cloruro. La penetración de cloruros es perjudicial, ya que puede desencadenar la corrosión del acero de refuerzo, lo que compromete la integridad y durabilidad de la estructura.

Para caracterizar la resistencia a la penetración de cloruros se realizaron dos ensayos, el ensayo de migración acelerada de cloruros cumpliendo con la norma (NT



BUILD 492,1999), con este ensayo se obtuvo el coeficiente de migración de cloruros y el ensayo de difusión de cloruros, cumpliendo con la norma (NT BUILD 443,1995), para valoración de cloruros libres la norma (UNE-EN-14629, 2007), y para cloruros combinados (RILEM TC178-TMC,2002) , obteniendo de esta manera el coeficiente efectivo y aparente de cloruros.

Como se mencionó anteriormente para estos ensayos se utilizaron probetas cilíndricas, las cuales fueron partidas en secciones. Para el ensayo de migración se utilizó media probeta de 5cm, mientras que para el ensayo de difusión se utilizó una de 7cm, de cada amasada de mortero para cada arcilla.

4.2.3.2.1 Migración acelerada de cloruros.

El ensayo de migración de cloruros acelerada, conforme a la norma noruega (NT BUILD 492, 1999), se utiliza para evaluar la capacidad de un mortero, en este caso, para resistir la migración de cloruros en condiciones aceleradas. La migración de cloruros es un fenómeno que puede ocurrir en ambientes agresivos, como áreas costeras o entornos con altos niveles de cloruros, y puede provocar la corrosión de las armaduras de acero en estructuras de hormigón.

En este ensayo, básicamente, a las probetas de mortero se les aplica un voltaje eléctrico externo constante en forma axial, mediante el cual se induce la migración de iones cloruro del exterior a través del mortero, simulando el proceso de corrosión acelerada.

El ensayo es una herramienta importante para garantizar la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de las estructuras de hormigón, ya que ayuda a prevenir la corrosión de las armaduras y los posibles daños asociados.

En nuestro caso se siguió el siguiente procedimiento, las probetas una vez amasadas y desmoldadas se mantienen por un período de 28 día en la cámara de curado con una humedad de aproximadamente 90% y temperatura de 21-24°C, tras la finalización de este tiempo se procedió a cortar las probetas a 50 mm, según lo indicado en la norma noruega.

Estas rodajas se limpian y se colocan en un desecador conectado a una bomba de vacío, garantizando una presión de vacío entre 1 y 5 kPa. Se mantienen en este desecador por 3 horas, tras este tiempo se agrega al desecador una disolución saturada de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, compuesta por 2,5g de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por cada litro de agua destilada, como se muestra en la Figura 25.

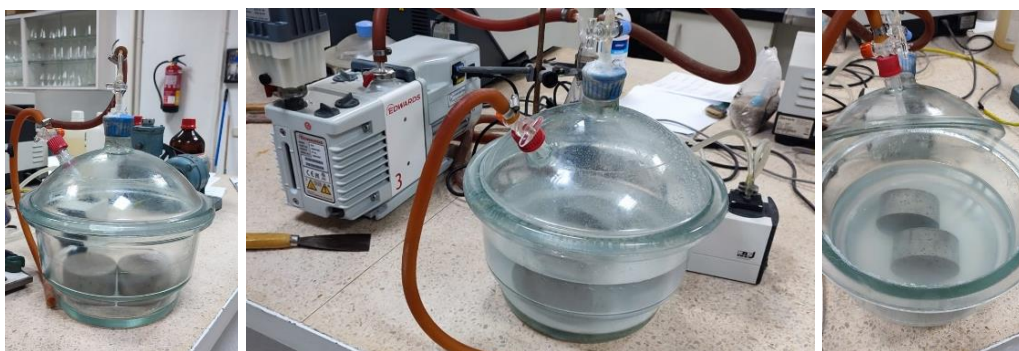


Figura 25. De izquierda a derecha, probetas en cámara de vacío, cámara de vacío + disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, solo disolución. (Fotografías propias).

Esta disolución debe cubrir totalmente las probetas y se tiene que agregar al desecador manteniendo la bomba de vacío encendida, permaneciendo así durante una hora para saturar las probetas. Transcurrido este tiempo se apaga la bomba las probetas permanecen en esas condiciones durante 18 +/- 2 horas.

Una vez finalizado este proceso, las probetas se colocan en un dispositivo de ensayo diseñado conforme a la norma. Este dispositivo consta de un cilindro hueco de goma en el que se introducen las probetas, asegurándose de que queden selladas dentro del cilindro mediante bridas metálicas. El cilindro se coloca dentro de una bandeja inclinada a 32°, donde la parte inferior queda sumergida en una solución catódica preparada con cloruro de sodio (NaCl) al 10% de masa en 12 litros de agua.

En la parte superior del cilindro, cubriendo la cara de la probeta, se coloca una disolución anódica preparada con hidróxido de sodio (NaOH) 0,3 molar en 500 ml de agua. Los cloruros que son cargas negativas se desplazan al polo positivo que es cátodo. A continuación, se conecta un electrodo, con el polo negativo sumergido en la solución catódica y el polo positivo en la solución anódica. Ambos electrodos están conectados a una fuente de corriente eléctrica que proporciona un voltaje estable de

30 V. Se registran los datos iniciales de intensidad de corriente y se ajusta el voltaje según la tabla especificada en la normativa (Tabla 8). En este caso, se utilizó un tiempo de ensayo de 24 horas y se variaron los voltajes para las dos muestras analizadas.

En la figura 26 se muestra el armado del ensayo, con las probetas dentro de los cilindros de goma colocados a 32° dentro de la bandeja, con la solución catódica y anódica, conectados a la fuente de corriente eléctrica.

Tabla 8 Tabla de valores de ajuste de voltaje y tiempos según amperaje inicial del ensayo (NT BUIL 492, 1999).

Initial current I_{30V} (with 30 V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration t (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6



Figura 26 Armado del ensayo de migración acelerada. (Fotografías propias).

Transcurrido el tiempo de duración del ensayo, se retiran las probetas del dispositivo, se secan a temperatura ambiente, se le realiza el ensayo brasileño y sobre las caras

cortadas por este ensayo se rocía una solución de nitrato de plata (Ag NO_3) a 0,1 molar. Esta solución provoca que los iones de cloruros se combinen con la plata originando un precipitado visible de Cl Ag , permitiendo conocer la profundidad a la que han penetrado dentro de la muestra estos.

En las figuras 27 y 28 se muestran las probetas partidas a corte axial, rociadas con nitrato de plata y perfiles de profundidad marcados, para las series A y B.

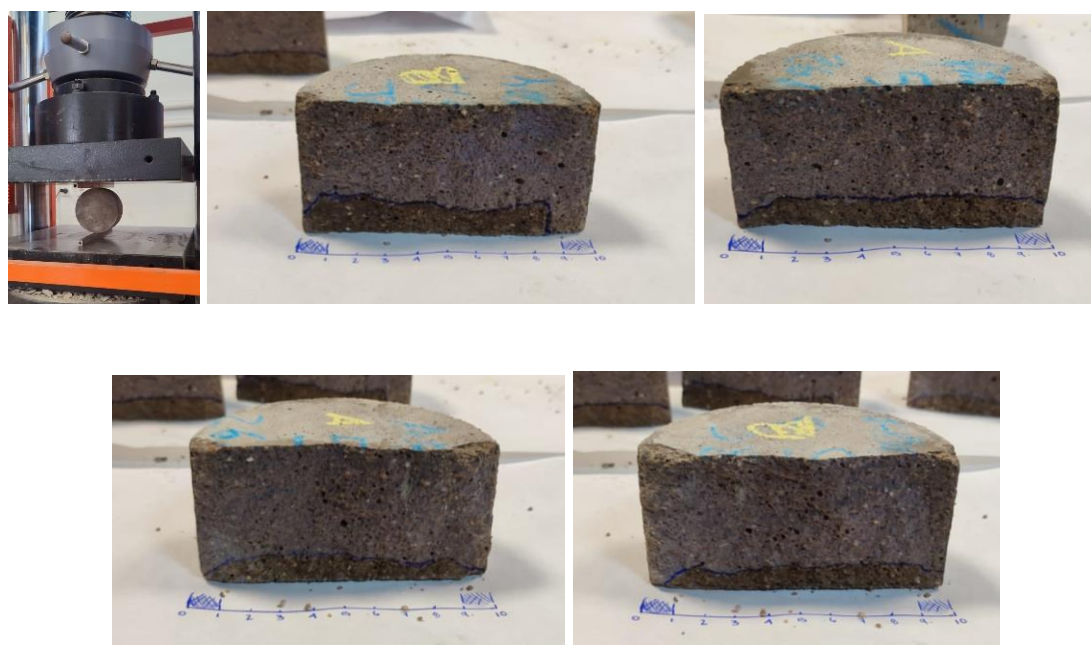


Figura 27 De izquierda a derecha, ensayo brasileño, probetas Arcilla 5. (Fotografías propias).



Figura 28 Probetas Arcilla 1. (Fotografías propias).

Para obtener los valores de profundidad se traza una línea paralela a la cara plana del cilindro, la cual se divide en 10 segmentos iguales de aproximadamente 10mm,

se descartan los primeros puntos de cada lado de la probeta y se mide la profundidad de forma perpendicular a la línea en los 7 puntos intermedios como se muestra en la figura 29. Estas medidas se utilizan para el cálculo del coeficiente de migración a través de la siguiente expresión simplificada.

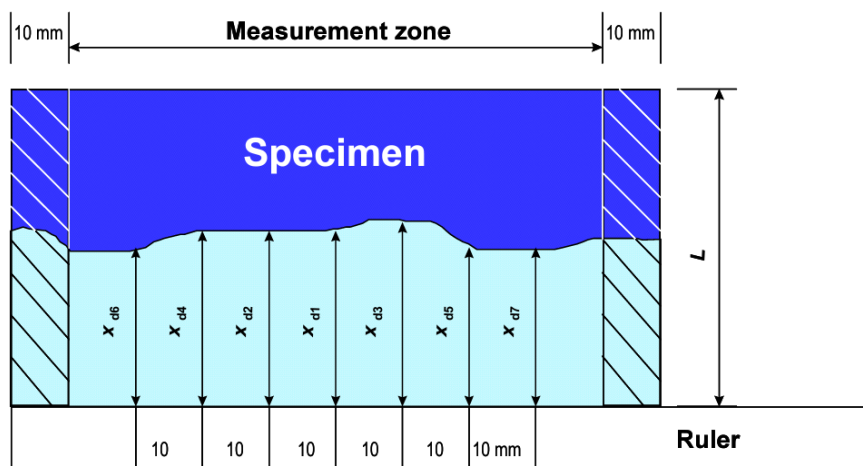


Figura 29 Esquema instructivo para análisis de probetas (NT BUILD 492, 1999).

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} (X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)LX_d}{U - 2}})$$

donde:

D_{nssm} coeficiente de migración no estacionario en $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$.

U valor absoluto de voltaje aplicado en V.

T valor promedio de temperatura inicial y final en solución anódica en $^{\circ} \text{C}$.

L espesor del espécimen en mm.

X_d valor promedio de profundidades de penetración en mm.

t duración del ensayo en horas.



4.2.2.2.2 Difusión de cloruros.

Las probetas, una vez transcurridas 24 horas desde su fabricación, son extraídas del molde y sometidas a un proceso de curado en una cámara durante 28 días, siguiendo rigurosamente las pautas establecidas en la norma NT BUILD 443 (1995). Al alcanzar esta edad, las probetas son cortadas en dos partes de manera precisa.

Para llevar a cabo el ensayo de penetración de cloruros, se elige una sección específica de la probeta, la cual es sumergida en una disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con agua destilada al 0,1% durante un período de 24 horas. Tras finalizar este intervalo, las probetas son sometidas a un proceso de secado y se aplica una capa de resina en los laterales y la base, dejando únicamente expuesta la cara superior. Una vez que la resina se ha solidificado, las probetas son nuevamente inmersas en la disolución saturada hasta alcanzar una completa saturación. Este proceso se encuentra reflejado en la Figura 30.

A continuación, las probetas se sumergen en una disolución compuesta por NaCl al 3% en peso mezclado con agua destilada. Permanecen en esta disolución durante un período de 35 días, y al término de este lapso se procede a medir la cantidad de cloruros libres y totales presentes en las probetas.

Este ensayo brinda información fundamental acerca de la resistencia del mortero a la penetración de cloruros, permitiendo evaluar su durabilidad frente a la corrosión ocasionada por la presencia de estos agentes. Los resultados obtenidos en la medición de cloruros libres y totales (a partir de totales y libres por diferencia entre ambos podemos calcular los cloruros combinados) son empleados para evaluar la capacidad del mortero de resistir la penetración de cloruros y, en consecuencia, su resistencia a la corrosión.

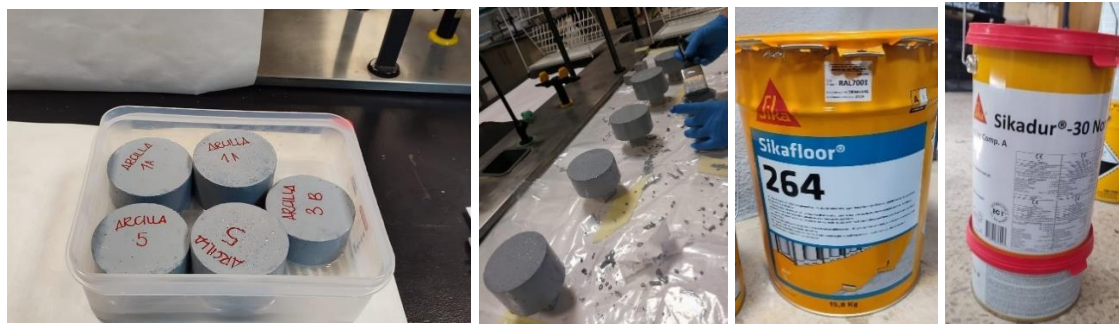


Figura 30 De izquierda a derecha, probetas con la cara expuesta sumergida en disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, aplicación de resina, productos componentes de la resina. (Fotografías propias).

Para obtener el contenido de cloruros y los coeficiente efectivo y aparente de transporte se utilizan las medidas de 10 profundidades distintas para las edades mencionadas. El proceso de obtención de la muestra se realiza utilizando un taladro columna, lijando la probeta cada 1mm, con el fin de obtener una muestra significativa de polvo de cada rodaja lijada, y el posterior perfil de penetración de cloruros.

En la Figura 31 se muestra la probeta colocada en el soporte y con la base del taladro columna, utilizado para medir la profundidad lijada y las dos muestras, en este caso de la Arcilla 5 TC, listas para lijarlas. La Figura 32 muestra las probetas ya lijadas y una serie ya con el polvo en los frascos para su análisis.



Figura 31 Probetas de Arcillas 5TC, lote A y B, taladro columna. (Fotografías propias).

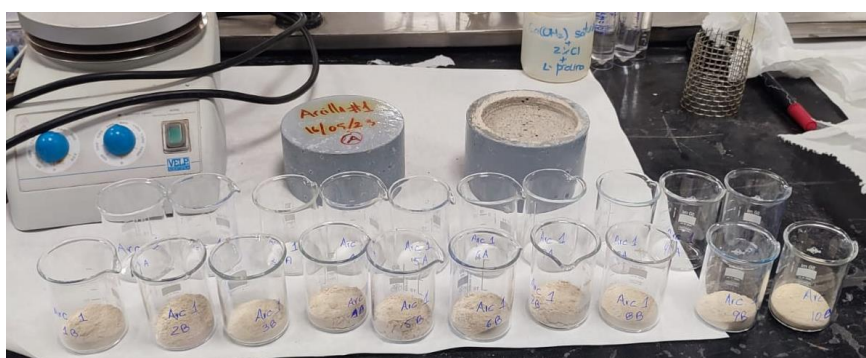


Figura 32 Probetas de Arcillas 1 A y 5TC, lote A y B, recipientes para receptor muestras del lijado cada 1mm. (Fotografías propias).

Las muestras obtenidas son sometidas a un proceso de secado en un horno durante 24 horas y serán utilizadas tanto para las mediciones de cloruros libres como para cloruros totales. Para llevar a cabo estas extracciones, se siguieron las recomendaciones establecidas por la RILEM TC178-TMC (2002) y la norma UNE EN 14629 (2007), respectivamente.

La medición de cloruros libres se realiza dentro de las 48 horas posteriores a la extracción de la disolución. Se sabe que la carbonatación de las muestras afecta parcialmente a los cloruros combinados, lo que incrementa el contenido de cloruros libres en la muestra.

Proceso de extracción para cloruros Libres:

El proceso de extracción de cloruros libres comienza pesando diez muestras de lijado de aproximadamente $1g \pm 0,00010 g$ obtenidas de las capas superficiales de 1mm sacadas de la probeta. Estas muestras se colocan en recipientes de 150 ml, a los que se les añaden 10 ml de agua destilada. Luego, se introduce un agitador magnético y

se agita mecánicamente durante 3 minutos, controlando el tiempo de agitación. Pasado este tiempo, se retira la muestra y se filtra a través de embudos con filtros de pliegues previamente humedecidos con agua destilada, tal como se muestra en la figura 33. Los vasos utilizados para la extracción se limpian con 2 ml adicionales de agua destilada y también se colocan en los embudos.

El filtrado se recoge en matraces aforados de 100 ml, se tapan y se agitan para homogeneizar la mezcla a la que se le añaden 2ml HNO₃ concentrado. A continuación, se transfiere nuevamente a contenedores y se añaden 20 ml de ácido acético concentrado CH₃COOH para acidificar el medio y estabilizar los cloruros disueltos. Por último, se agregan 0,50 g de acetato para completar la preparación de la muestra, como se muestra en la figura 34.

Es importante asegurarse de homogeneizar adecuadamente la mezcla antes de realizar la valoración en el equipo potenciométrico. Se deben seguir los procedimientos descritos con precisión y rigor para garantizar la integridad y validez de los resultados obtenidos en la valoración de los cloruros libres en las muestras extraídas.



Figura 33 De izquierda a derecha, proceso de agitación mecánica, Matraces con embudos y filtros para filtrar la mezcla. (Fotografías propias).



Figura 34 De izquierda a derecha, adición de 2ml de HNO_3 , adición de 20ml de Ácido Acético Y 0.50 gr de acetato de sodio. (Fotografías propias).

El valorador potenciométrico utiliza la precipitación del cloruro con nitrato de plata (0,025M) como reacción de referencia. Se determina el punto final mediante un electrodo de Ag/Cl Ag. Proceso mostrado en la figura 38.



Figura 35 Equipo potenciométrico con solución de nitrato de plata para cuantificar concentraciones de cloruros. (Fotografías propias).

Después de realizar la medición de cloruros libres, se procede a extraer los cloruros combinados o totales para determinar la cantidad de cloruros aparentes presentes en la mezcla.



Proceso de extracción para cloruros totales:

El método utilizado consiste en mezclar 100 ml de agua destilada con aproximadamente $1 \text{ g} \pm 0,00010 \text{ g}$ de muestra en polvo obtenida del lijado, y se agregan 5 ml de ácido nítrico de concentración 1 molar. Esta mezcla se lleva a ebullición y se mantiene hirviendo durante 3 minutos, asegurando la correcta mezcla de los componentes mediante el uso de un agitador magnético.

Una vez que la mezcla ha enfriado, se utilizan 5 ml adicionales de agua destilada para limpiar la tapa del recipiente donde se encuentran los residuos de la evaporación, así como el agitador utilizado y el contorno del vaso, con el fin de recuperar los cloruros presentes en estos elementos. A esta solución se le añaden 20 ml de ácido acético glacial y 0,5 g de acetato de sodio. Esta combinación de componentes ha sido estudiada en investigaciones previas para ajustar el pH a 4,78 y optimizar la extracción de cloruros.

Posteriormente, se valora la solución utilizando un equipo potenciométrico. Se utiliza una disolución de nitrato de plata al 0,0.05 molar y se detecta el punto final mediante un electrodo selectivo Ag/ClAg.

Tanto para la medición de cloruros libres como para la extracción de cloruros combinados, el equipo potenciométrico proporciona la concentración de cloruros en cada profundidad. Con estos valores, se calcula el coeficiente de cloruros aparente y efectivo utilizando la función de error establecida en la norma (NT BUILD 443,1995) cumpliendo con los requisitos de la norma (UNE-EN 14629,1997).

4.2.3.3 Carbonatación.

La carbonatación es un proceso químico en el cual el dióxido de carbono (CO_2) presente en el aire reacciona con los compuestos de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), presentes en el mortero, formando carbonato de calcio (CaCO_3).

En este ensayo, se tomaron probetas de mortero y se exponen a una atmósfera con una alta concentración de dióxido de carbono (3%) durante un período de 7 y 28 días. Durante este tiempo, el CO₂ penetra en el mortero y reacciona con el hidróxido de calcio, produciendo carbonato de calcio en el interior de las muestras.

En nuestro caso, una vez hechas las probetas, se desmoldaron, después de 24 horas a temperatura ambiente en el laboratorio y se colocaron por 28 días dentro de la cámara de curado. Posteriormente se cortan las probetas de ambos morteros de 7cm de altura y se colocan en la cámara de preparación con humedad y temperatura constantes por 14 días.

Completado este proceso las probetas se introdujeron a la cámara de carbonatación donde permanecieron 7 y 28 días dentro de ésta en unas condiciones de concentración del 3% de dióxido de carbono, temperatura 20°C+/-2°C, y humedad relativa de 57%+/-3%. Esta cámara cumple con lo indicado en la norma (UNE-EN 12390-12), y se mantiene un registro de su temperatura, humedad y dióxido de carbono para garantizar que cumple con lo establecido en la norma. Ver Figura 36.



Figura 36. Cámara de carbonatación, dispositivo control de concentración de CO₂, sensor de humedad, temperatura y probetas colocadas en la cámara de carbonatación. (Fotografías propias).

Las probetas están programadas para ser analizadas a los 7, 28 y 70 días después de introducidas en la cámara de carbonatación, con este trabajo analizaremos por cuestión de tiempo solo hasta los 28 días.

Para analizar los resultados obtenidos, se cortó una rodaja de 2 cm de altura aproximadamente, para realizar la medición de la penetración de la carbonatación como se muestra en la Figura 37.



Figura 37. De izquierda a derecha, maquina cortadora de hormigón / morteros, probeta cortada en rebanadas. (Fotografías propias).

Inmediatamente después del corte, se limpia la superficie de la probeta y se coloca la solución reveladora de pH, que consiste en 0,8 g de fenolftaleína en polvo disuelta en 30 ml de agua desionizada y 70 ml de etanol.

Esta solución ocasiona un cambio de coloración en la probeta en un rango de pH 8,5-9. Cabe recalcar que el pH en condiciones normales del hormigón es del orden de 13. El cambio de color es de rosa fucsia a incoloro cuando el pH es del orden de 8,5 - 9 o inferiores.

Las probetas fueron evaluadas con el indicador de la fenolftaleína como se muestra en la Figura 38.

Tabla 9 Resultados ensayo de consistencia para morteros. en las Arcillas 1A y 5TC. (Autoría propia).

MORTERO	PRIMERA PRUEBA		SEGUNDA PRUEBA	
	SP (%)	PENETRA (mm)	SP (%)	PENETRA (mm)
REFERENCIA	---	33		
ARCILLA 1 A	2,0	No penetra	4,0	32
ARCILLA 5TC	0,4	25	0,6	30

Trabajabilidad óptima requerida del orden de 6 ± 2 mm.

Tabla 10 Resultados ensayo de consistencia para pastas. en las Arcillas 1A y 5TC. (Autoría propia).

PASTAS	SP (%)	PENETRA
REFERENCIA	---	6 ± 2 mm
ARCILLA 1 A	1,5	4
ARCILLA 5TC	0,1	7

5.1.2 Análisis Térmico Diferencial. (ATD).

El ATD es una técnica utilizada en ciencias de los materiales y química para estudiar los cambios en las propiedades físicas y químicas de una muestra en función de la temperatura.

El análisis térmico diferencial (ATD) es una técnica que permite determinar también la cantidad de portlandita y gel CSH presentes en una muestra mediante la medición de la pérdida de masa ocasionada por la disminución del agua combinada con estos componentes en rangos de temperatura específicos. Además, este ensayo proporciona información sobre el grado de hidratación de las pastas, a través de la medición del contenido total de agua combinada. Estos datos son de gran relevancia, ya que pueden justificar las resistencias obtenidas en los materiales analizados.

En las figuras 39, 40, 41, 42 y 43 se observan las curvas dTG vs Temperatura para los 2, 7, 14 y 28 días de hidratación de las pastas de Arcilla 1A, Arcilla 5TC y Referencia. Podemos observar que de forma general a las cuatro edades de hidratación en el tramo 1 (**T1**), comprendido entre los 105°C a 430°C, se produce una



pérdida del peso relacionada con el agua contenida en el gel C-S-H, siendo las edades tempranas (7, 14 días) las más similares en magnitud de velocidad de pérdidas de peso en ambas arcillas con un -0.25 mg/min.

En las edades más avanzadas las pérdidas son mayores y varían dependiendo de la arcilla:

Arcilla 1:

14 días, la Arcilla 1 tiene velocidad de pérdidas de peso del orden de -0.55 mg/min.

28 días del orden de -0.9 mg/min

Arcilla 5:

14 días, la Arcilla 5 tiene pérdidas del orden de -0.65 mg/min

28 días, la Arcilla 5 tiene pérdidas del orden de -0.30 mg/min

Esta situación evidencia que existe una pérdida de agua relacionada con los geles CSH, a las tres edades de hidratación desde 105°C a 430°C (T1), a cortas edades las pérdidas son similares en ambas arcillas de bajo valor, pero a edades mayores la Arcilla 1 experimenta mayores pérdidas de que Arcilla 5.

En el tramo 2 (**T2**), comprendido entre los 430°C a 530°C ocurre la deshidroxilación de la portlandita; en este rango es necesario realizar un ajuste debido a la posible carbonatación parcial de la portlandita, que puede aparecer incluida en el rango de temperatura donde se produce la pérdida de carbonatos, o sea en el tramo 3 (T3) comprendido entre los 530°C a 1100°C ; si como consideración inicial se establece que las muestras no están carbonatadas, el carbonato que se visualice, derivará de la carbonatación de la portlandita.

Por este motivo, para conocer el porcentaje total de portlandita en las pastas es necesario, sumar el porcentaje de pérdida de masa en el tramo T2 más el 41% de T3. (MA de la Rubia,2018)

En las Tabla 11 y 12, se muestran las comparaciones de pérdidas de masa de las Arcillas 1A y 5 TC a los 2, 7 ,14 y 28 días de hidratación y asociadas a las temperaturas T1, T2, y T3, que como antes mencionamos, se asocian a los diferentes componentes de las pastas.

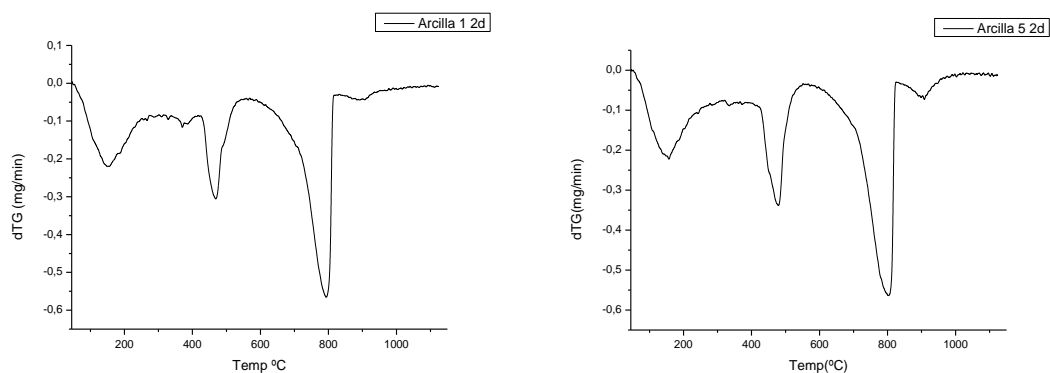


Figura 39 Gráficos dTG vs Temp a 2 días de edad para Arcilla 1A y Arcilla 5TC (Propia autoría).

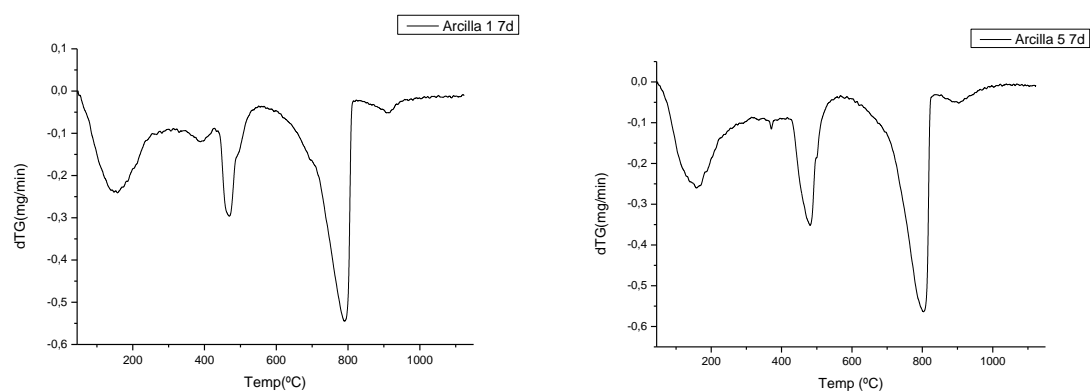


Figura 40 Gráficos dTG vs Temp. a 7 días de edad para Arcilla 1A y Arcilla 5TC (Propia autoría).

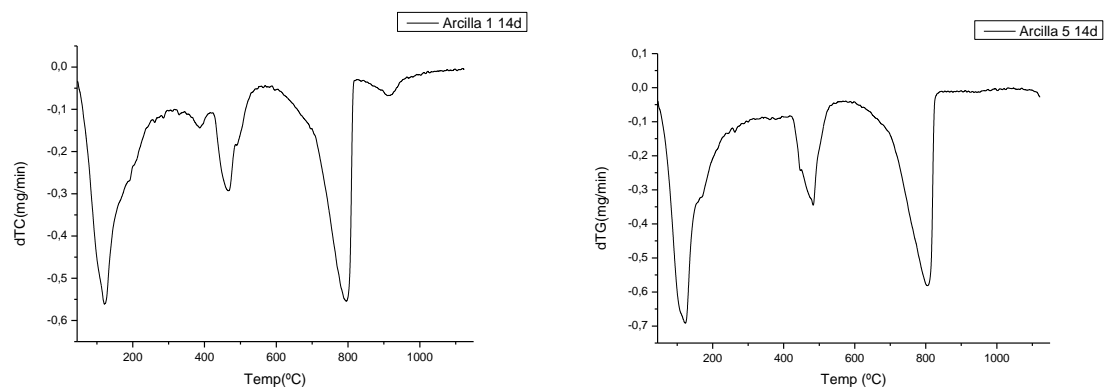


Figura 41 Gráficos dTG vs Temp. a 14 días de edad para Arcilla 1A y Arcilla 5TC (Propia autoría).

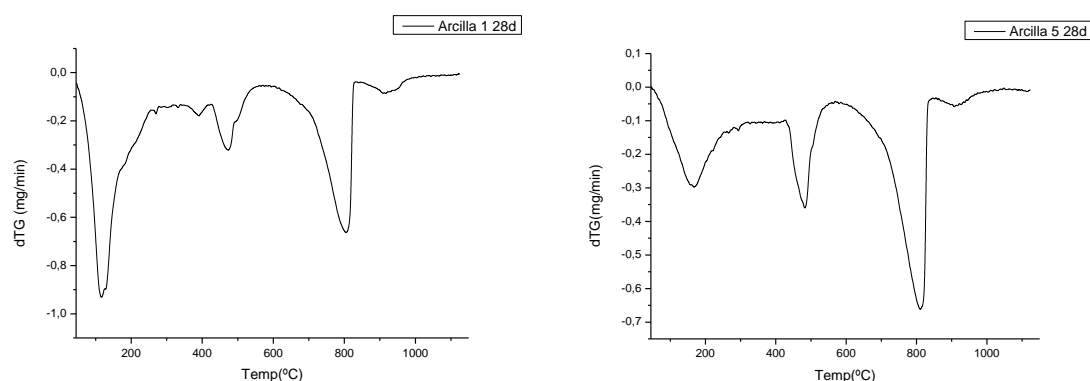


Figura 42 Gráficos dTG vs Temp. a 28 días de edad para Arcilla 1A y Arcilla 5TC (Propia autoría).

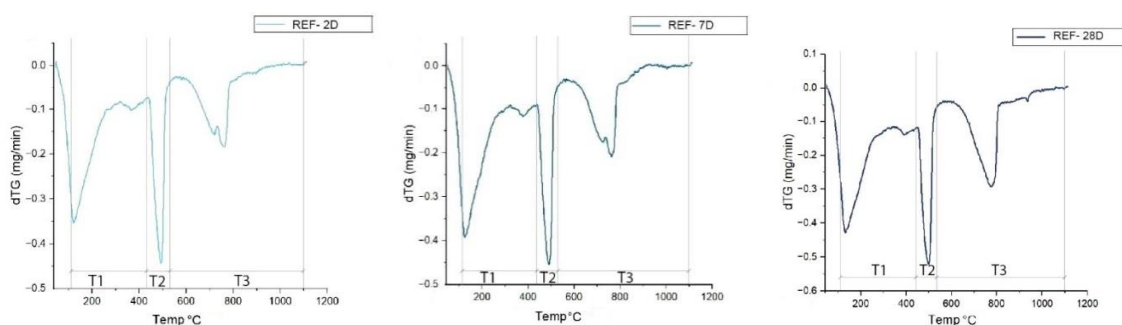


Figura 43 Gráficos dTG vs Temp. a 2, 7 y 28 días de edad para cemento Referencia 45.5 (Propia autoría).

Tabla 11 Tabla valores de pérdida de masa asociado a temperaturas. Arcilla 5TC. (Autoría propia).

Hidratación (Días)	ARCILLA 5 TC						
	T1 C-S-H (%)	T2 CH (%)	T3 Carbonatos (%)	T3.CH (0,41*T3) (%)	H ₂ O total combinada (%)	Calcio equivalente (%)	CSH / Total CH (%)
	105 - 430 °C	430 - 530 °C	530 - 1100°C	530 - 1100°C	(T ₁ +T ₂ +T ₃)	(T ₂ +T ₃)	T ₁ / (T ₂ +T ₃)
2	5,451	3,804	9,776	4,008	13,263	13,58	0,401
7	6,937	3,674	9,467	3,881	14,492	13,141	0,528
14	9,136	3,439	8,691	3,563	16,138	12,13	0,753
28	7,628	3,759	10,8	4,428	15,815	14,559	0,524

El dato de 28 días de la arcilla 5TC es “extraño” porque disminuye el gel C-S-H aumenta la portlandita. Lo normal sería que disminuyese la portlandita y aumentase el gel CSH como ocurre al pasar de 2 a 7d y de 7 a 14d, pero no ocurre de 14d a 28d. Lo normal es que en la reacción puzolánica la portlandita reaccione con la arcilla para formar gel CSH secundario disminuyendo la portlandita.

Tabla 12 Tabla valores de pérdida de masa asociado a temperaturas. Arcilla 1A. (Autoría propia).

Hidratación (Días)	ARCILLA 1A						
	T1 C-S-H (%)	T2 CH (%)	T3 Carbonatos (%)	T3.CH (0,41*T3) (%)	H ₂ O total combinada (%)	Calcio equivalente (%)	CSH / Total CH (%)
	105 - 430 °C	430 - 530 °C	530 - 1100°C	530 - 1100°C	(T ₁ +T ₂ +T ₃)	(T ₂ +T ₃)	T ₁ / (T ₂ +T ₃)
2	7,384	3,503	11,081	4,543	15,43	8,046	0,9177
7	8,6178	3,2884	11,49	4,71	16,6162	7,9984	1,0774
14	10,465	3,4581	10,287	4,217	18,1401	7,6751	1,3635
28	11,82	3,049	9,94	4,075	18,944	7,124	1,6591

Tabla 13 Tabla valores de pérdida de masa asociado a temperaturas. Mortero de Referencia. (Autoría propia).

Hidratación (Días)	REFERENCIA 42,5						
	T1 C-S-H (%)	T2 CH (%)	T3 Carbonatos (%)	T3.CH (0,41*T3) (%)	H ₂ O total combinada (%)	Calcio equivalente (%)	CSH / Total CH (%)
	105 - 430 °C	430 - 530 °C	530 - 1100°C	530 - 1100°C	(T ₁ +T ₂ +T ₃)	(T ₂ +T ₃)	T ₁ / (T ₂ +T ₃)
2	7,81	3,53	4,2	1,72	13,06	5,25	1,49
7	8,89	3,8	4,79	1,96	14,65	4,76	1,54
14							
28	9,44	4,03	6,24	2,56	16,03	6,59	1,43

De los datos obtenidos de estas tablas 11,12 y 13 podemos observar que la Arcilla 1A posee mayores porcentajes de valores de gel C-S-H, incluso superiores al mortero de referencia, el cual posee relación directa con las propiedades mecánicas, más sin embargo posee menos porcentaje de portlandita a avanzadas edades, lo que la hace más vulnerable en temas de durabilidad. Con la excepción de 28 d de la arcilla 5TC los resultados son coherentes y las arcillas no retardan la hidratación a edades iniciales de curado e incluso se pone de manifiesto que aceleran la hidratación porque la portlandita formada a 2d para un contenido de cemento reducido en un 45% forma cantidades significativamente mayores que la pasta de cemento de referencia (columna T2 y calcio equivalente) y tabla 14. A 28d para la arcilla 1A se observa la extensión de la reacción puzolánica con más contenido de gel C-S-H y una reducción considerable de portlandita.

Tabla 14 Tabla valores de Portlandita Total. Arcillas 1A y 5TC. (Autoría propia).

% Portlandita Total [CH +(0,41*T3)]				
Muestras	2 días	7 días	14 días	28 días
Arcilla 1A	8,045	8,011	7,675	7,1253
Arcilla 5TC	7,812	7,556	7,002	8,187
Referencia	5,25	5,76		6,59

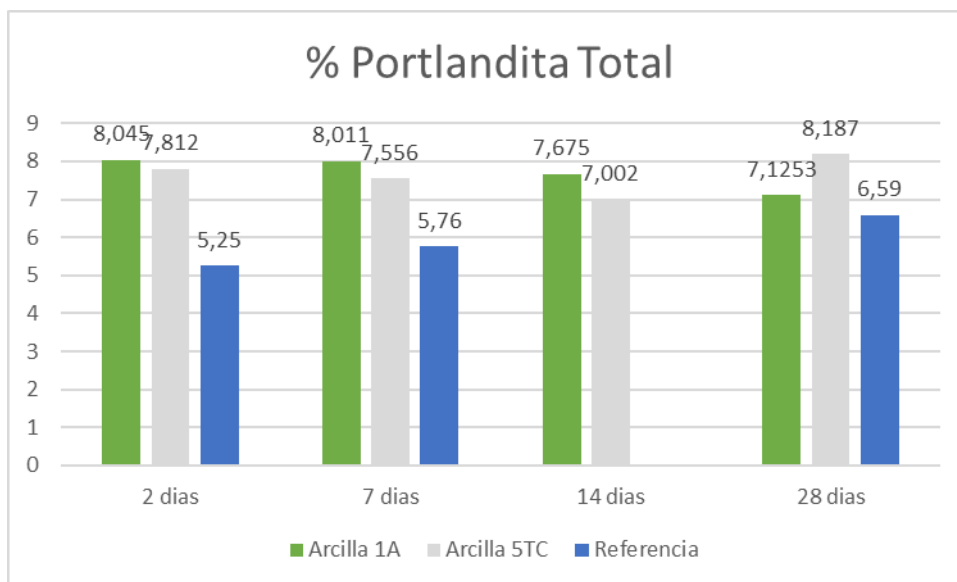


Figura 44 Comparación portlandita total de Arcilla 1A, Arcilla 5TC y mortero de referencia a los 2,7,14 y 28 días de hidratación. (Autoría Propia)

Tabla 15 Tabla valores del agua total combinada en las Arcilla 1A ,Arcilla 5TC y mortero de referencia a los 2,7,14 y 28 días de hidratación. (Autoría propia).

H ₂ O total combinada (%)				
Muestras	2 días	7 días	14 días	28 días
Arcilla 1A	14,431	16,616	18,141	18,944
Arcilla 5TC	13,263	14,492	16,138	15,815
Referencia	13,06	14,65		16,03

La mayor hidratación la presenta la arcilla 1A por tanto es de esperar que dicha arcilla presente el mejor comportamiento durable y mecánica comparado con la arcilla 5TC.

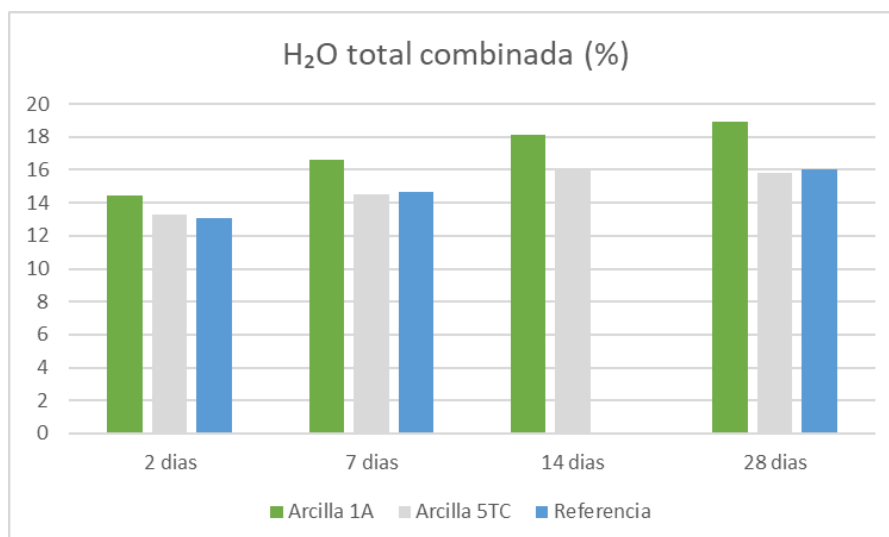


Figura 45 Comparación de porcentajes de agua totales a 2, 7 y 28 días de hidratación en Arcilla 1A, Arcilla 5TC y mortero de referencia. (Autoría Propia).

5.1.3 Ensayo de fraguado.

El ensayo de final de fraguado proporciona información valiosa sobre las propiedades de fraguado del mortero y su capacidad para desarrollar resistencia con el tiempo. El ensayo se llevó a cabo bajo las directrices de la norma (UNE EN 1015-9:1999) para ambas arcillas.

Período de fraguado mortero con Arcilla 1A

Tabla 16 Resultados ensayo de fraguado Arcilla 1A. (Autoría propia).

Muestra	Mortero sin tratar			Minutos	Masa (g)	Masa (kg)	N/mm ²
T _{fabricación}	9:15	0	t ₀	0			
T _{primera medida}	9:30	15	t ₁	15	136	0,1	0,05
T _{segunda medida}	9:45	15	t ₂	30	207	0,2	0,07
T _{tercera medida}	10:00	15	t ₃	45	700	0,7	0,23
T _{cuarta medida}	10:15	15	t ₄	60	895	0,9	0,30
T _{quinta medida}	10:30	15	t ₅	75	1290	1,3	0,43
T _{sexta medida}	10:45	15	t ₆	90	2120	2,1	0,71
	t total	90				Resultado	90

Período de fraguado mortero con Arcilla 5 TC

Tabla 17 Resultados ensayo de fraguado Arcilla 5TC. (Autoría propia).

Muestra	Mortero sin tratar			Minutos	Masa (g)	Masa (kg)	N/mm ²
T fabricación	9:25	0	t0	0			
T primera medida	9:40	15	t1	15	281	0,3	0,09
T segunda medida	9:55	15	t2	30	341	0,3	0,11
T tercera medida	10:10	15	t3	45	567	0,6	0,19
T cuarta medida	10:25	15	t4	60	884	0,9	0,29
T quinta medida	10:40	15	t5	75	1320	1,3	0,44
T sexta medida	10:55	15	t6	90	1680	1,7	0,56
	t total	90				Resultado	90

Los resultados obtenidos en este ensayo, evidencian que tanto la Arcilla 1A como la Arcilla 5TC, presentan tiempos de fraguado de 90 minutos, como se muestran en las Tablas 16 y 17 respectivamente.

5.2 Propiedades mecánicas.

En este acápite se exponen los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos realizados a los morteros elaborados con adiciones de las Arcillas 1A y Arcilla 5TC para caracterizarlos y determinar su resistencia a compresión y flexo tracción. En la Tabla 18 se encuentran los resultados.

5.2.1 Resistencia a compresión.

Los resultados de la resistencia a compresión de los morteros se muestran en la siguiente Tabla 18, en contraposición con el mortero de referencia.

Tabla 18 Resultados de propiedades mecánicas. Resistencia a compresión (Autoría Propia)

COMPRESION (Mpa)			
Edad	Referencia	Arcilla 1A	Arcilla 5 TC
2	34,9	19,7	17,8
7	52,3	34,2	27
28	61,6	47,6	31,3

Los resultados de la resistencia a compresión de los morteros con arcillas no llegaron a valores similares al mortero de referencia. Ver Figura 47.

La Arcilla 1A alcanza valor de resistencia de 47.6 Mpa, por encima de la resistencia mínima del cemento 42.5 Mpa utilizado para su elaboración a los 28 días.

La Arcilla 5TC no alcanza el valor mínimo del cemento 42.5 Mpa por mucha diferencia. Cabe destacar que este análisis se realizó con los valores medios de los ensayos correspondientes de seis probetas.

La arcilla 1A evoluciona progresivamente casi de manera lineal en las propiedades mecánicas, en cambio la arcilla 5TC sufre un proceso de estancamiento en la evolución de las propiedades mecánicas

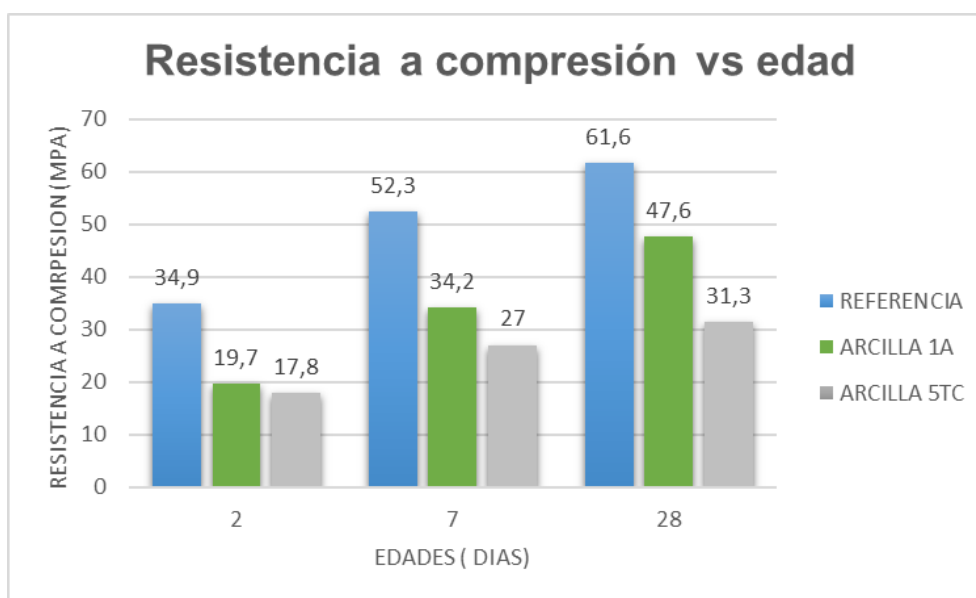


Figura 46 Gráfico comparativo de resistencias a compresión (Autoría Propia)

5.1.2. Resistencia a flexo-tracción.

Los resultados obtenidos a través del ensayo de resistencia a flexo-tracción demuestran que estos morteros poseen mejor respuesta a este fenómeno que a la compresión. Se evidencia en la Tabla 19, que la Arcilla 1A posee mejor respuesta que la Arcilla 5TC. Ver Figura 47

Los resultados nos llevaría a presumir que los morteros con adición de Arcilla 1A, presentan mayor resistencia a flexotracción a edades tempranas y esto puede deberse a la finura que aporta a la matriz interna del mortero la arcilla y a la formación fibrilar de su estructura. Ver Figura 47 y Tabla 19.

Tabla 19 Resultados de propiedades mecánicas. Resistencia a flexo tracción (Autoría Propia).

FLEXOTRACCION (Mpa)			
Edad	Referencia	Arcilla 1A	Arcilla 5 TC
2	5,1	4	3
7	7,4	6,7	4,2
28	8,2	7,8	5,6

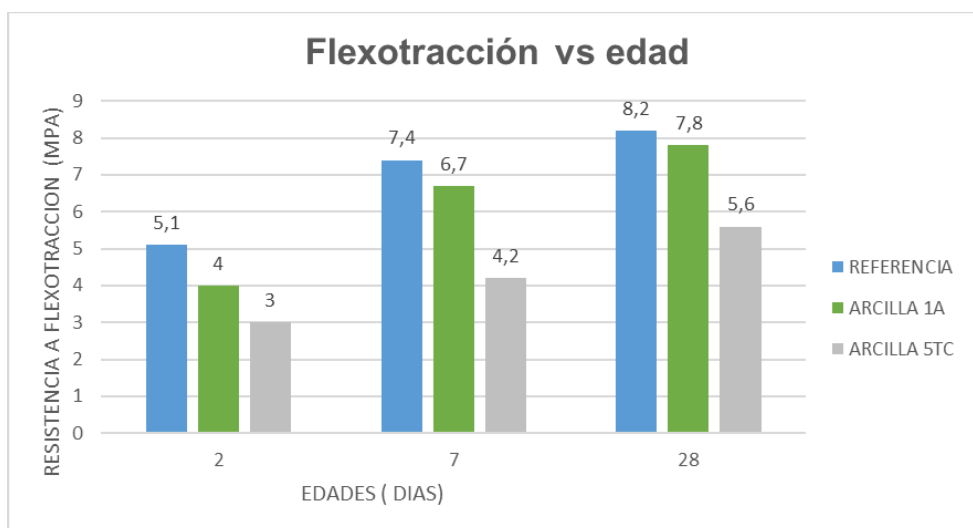


Figura 47 Gráfico comparativo de resistencias a flexotracción (Autoría Propia)



5.2 Durabilidad.

5.2.1 Resistividad

El ensayo de resistividad en morteros es una prueba utilizada para evaluar la capacidad de un mortero para resistir la corrosión y la penetración de agentes agresivos, como los iones cloruro. La resistividad eléctrica es una medida de la oposición al flujo de corriente eléctrica a través del mortero. A mayor valor de resistividad, mayor oposición al paso de corriente tiene el mortero, o sea significa que la matriz de poros se encuentra más cerrada. Resultados en la Tabla 20 y figura 48.

Tabla 20 Resultados de ensayo de resistividad. (Autoría Propia).

RESISTIVIDAD (Ohm*m)			
Edad	Referencia	Arcilla 1A	Arcilla 5TC
2 días	16,2	9,5	11,8
7 días	28,1	25,3	19,8
14 días	38,6	47,2	33,2
28 días	45,4	63,7	57,9
60 días	48,9	86,2	91,1

Los datos de resistividad indican que la arcilla 1A refina, cierra o produce la reducción de la conexión de la porosidad con un cambio muy significativo de 2 a 7d mientras que en la arcilla 5TC este salto se produce desde 14 días, lo cual indicaría que la reactividad de la arcilla 1A es mayor que la arcilla 5TC para edades de curado iniciales, igualándose el comportamiento para edades de 28d para ambas arcillas calcinadas, siendo éstas muy superiores al mortero de referencia

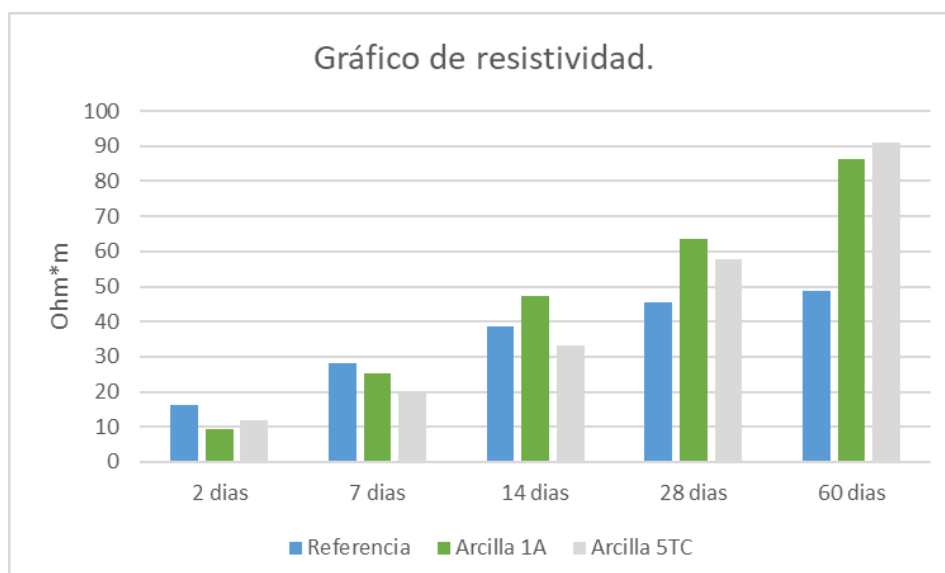


Figura 48 Gráfico comparativo de valores de resistividad a morteros con la Arcilla 1A, Arcilla 5TC y cemento de referencia 42.5. (Autoría Propia)

5.2.2. Penetración de cloruros

Difusión: En este ensayo, se toman muestras del material y se exponen a una solución salina de cloruro de sodio (NaCl) durante un período determinado. Durante esta exposición, los iones cloruro se desplazan a través del material por difusión por gradiente de concentración (existe una diferencia de cloruros entre el exterior y la probeta. La fuerza impulsora es esta diferencia de concentración de cloruros entre el exterior o fuera de la probeta (en la disolución) y el interior de la probeta. Después de un tiempo determinado, las muestras se extraen y se realizan mediciones para determinar la cantidad de cloruros que han penetrado en el material.

5.2.2.1 Migración acelerada de cloruros.

La migración acelerada de cloruros es un fenómeno que ocurre en estructuras de hormigón, donde los iones cloruro se desplazan a través del material a una velocidad mayor de lo que sucedería en condiciones normales de exposición, esto debido a la aplicación de corrientes eléctricas externas, según indica la norma consultada para este ensayo. Migración: La fuerza impulsora es la aplicación de un voltaje o potencial

eléctrico que fuerza a los cloruros a desplazarse por la diferencia de potencial aplicada, forzando el desplazamiento o migración de los cloruros del ánodo al cátodo.

Tabla 21 Coeficientes de migración de cloruros obtenidos de ambas series de muestras para la Arcilla 1A, Arcilla 5TC y cemento de referencia. (Autoría Propia)

Muestra	Coeficiente de migración E-12 m ² /s
Arcilla 1A (A)	12,33
Arcilla 1A (B)	10,88
Arcilla 5TC (A)	18,14
Arcilla 5 TC (B)	19,37
REF A	11,7
REF B	11,9

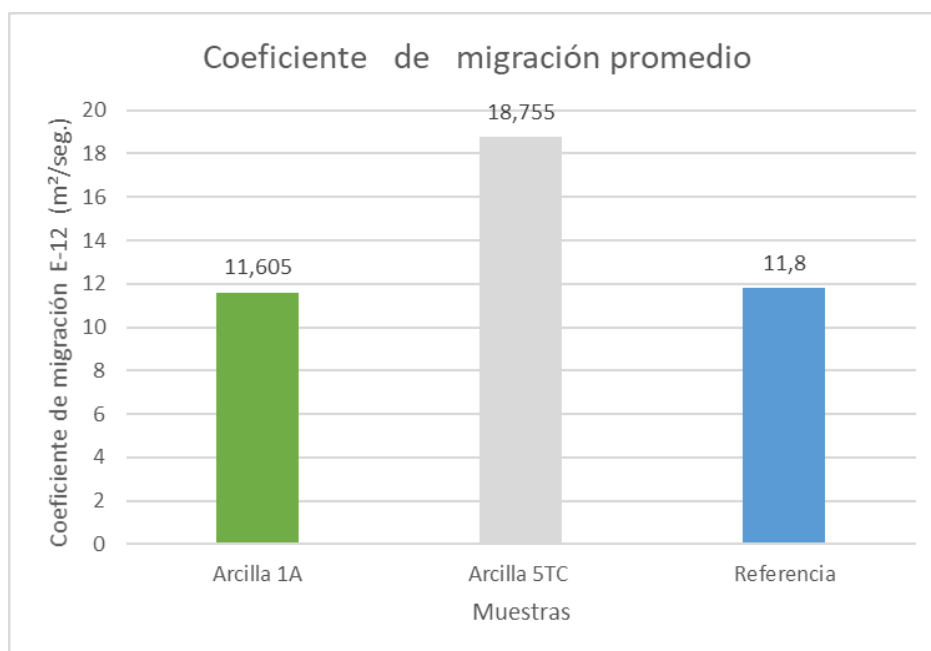


Figura 49 Gráfico comparativo de los coeficientes de migración de cloruros promedio para los tres cementos. (Autoría Propia)

En la tabla 21 se presentan los coeficientes de migración de cloruros, obtenidos a través del ensayo de migración acelerada, en probetas con 28 días en curado. Podemos observar como la Arcilla 1A presentan una mejor resistencia a la migración a los cloruros al tener un coeficiente más bajo, e incluso más bajo que el mortero de referencia, esto es verificable en la figura 50, en donde se muestran la penetración de los cloruros en las probetas analizadas.

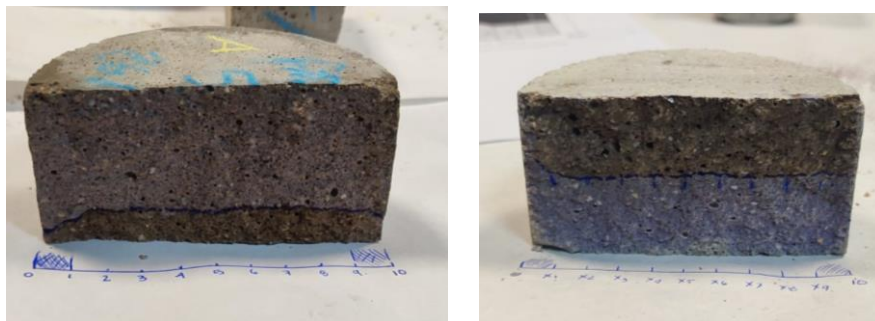


Figura 50 De izquierda a derecha, muestra de probetas del ensayo de migración acelerada en cloruros Arcilla 5TC y Arcilla 1A (Autoría Propia)

En la Figura 49 se muestra el gráfico comparativo de los coeficientes medios de migración de cloruros obtenidos para los tres cementos, se observa que los morteros de Arcilla 1A y el mortero de referencia, poseen coeficientes muy similares, mientras que el mortero con Arcilla 5TC, su coeficiente es muy superior

Esta cuestión confirma que el mortero con adición de Arcilla 1A es el que mejor comportamiento presenta en este ensayo de migración acelerada de cloruros.

En la Tabla 22 se muestran las penetraciones máximas para cada muestra, y en la figura 52 el comparativo las penetraciones máximas medias para cada mortero. Se observa que la serie A y B del mortero con adición de Arcilla 5 TC, obtuvo todas las penetraciones mayores.

Tabla 22 Valores de penetración máxima por cada muestra. (Autoría Propia)

Muestra	Penetración máxima
Arcilla 1A(A)	27,78
Arcilla 1A (B)	28,53
Arcilla 5TC (A)	39,83
Arcilla 5 TC (B)	42,68
REF A	19,55
REF B	28,78

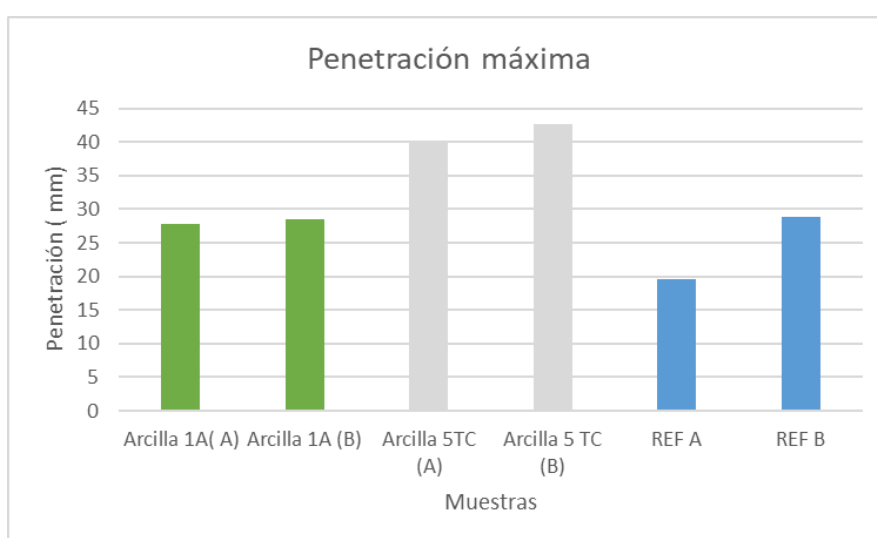


Figura 51 Gráfico comparativo de penetraciones máximas medias en las probetas analizadas (Autoría Propia)

Tabla 23 Intensidad de corriente inicial y final obtenidos en el ensayo de migración acelerada para todas las muestras. (Autoría Propia)

Intensidad de corriente (mA)		
Muestra	Inicial	Final
Arcilla 1A(A)	42	71
Arcilla 1A (B)	42	77
Arcilla 5TC (A)	57	105
Arcilla 5 TC (B)	58	108
REF A	59	59
REF B	60	76



Tabla 24 Voltaje obtenidos en el ensayo de migración acelerada para todas las muestras. (Autoría Propia)

Muestra	Voltaje (V)
Arcilla 1A(A)	30
Arcilla 1A (B)	35
Arcilla 5TC (A)	30
Arcilla 5 TC (B)	30
REF A	20
REF B	25

La Arcilla 1A, presenta un coeficiente de migración, valores de penetración máximas, e intensidad, **menor** que la Arcilla 5TC.

Un coeficiente de migración acelerada elevado en un mortero de arcilla indica que el material es permeable y permite una rápida migración de sustancias a través de su estructura. Esto puede tener implicaciones tanto positivas como negativas, dependiendo del contexto de uso y de las sustancias involucradas.

5.2.2.2 Difusión de cloruros.

La difusión de cloruros se refiere al proceso mediante el cual los iones cloruro se desplazan a través de un material poroso, como los morteros, desde una zona de alta concentración hacia una zona de baja concentración (gradiente de concentración), pueden ingresar al mortero a través de diversas fuentes como por ejemplo cuando la estructura es expuesta a el agua de mar, ambiente marino o sales de deshielo.

Una vez que los cloruros están presentes en el hormigón, pueden difundirse a través de los poros y capilares del material, lo que aumenta el riesgo de corrosión del acero de refuerzo si alcanzar la armadura.

Los cloruros pueden existir en diferentes formas en el hormigón: cloruros libres y cloruros combinados. Los cloruros libres se encuentran en forma iónica y son más móviles, lo que facilita su difusión a través del hormigón, son los responsables de la corrosión por “picaduras” de la armadura. Por otro lado, los cloruros combinados están unidos a los componentes del hormigón, enlazados químicamente y por lo tanto

más estables, formando parte de la Sal de Friedel ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) o fisisorbidos con enlaces más débiles en el gel C-S-H y C-(A)-S-H y su movilidad es más limitada.

5.2.2.2.1 Cloruros Libres.

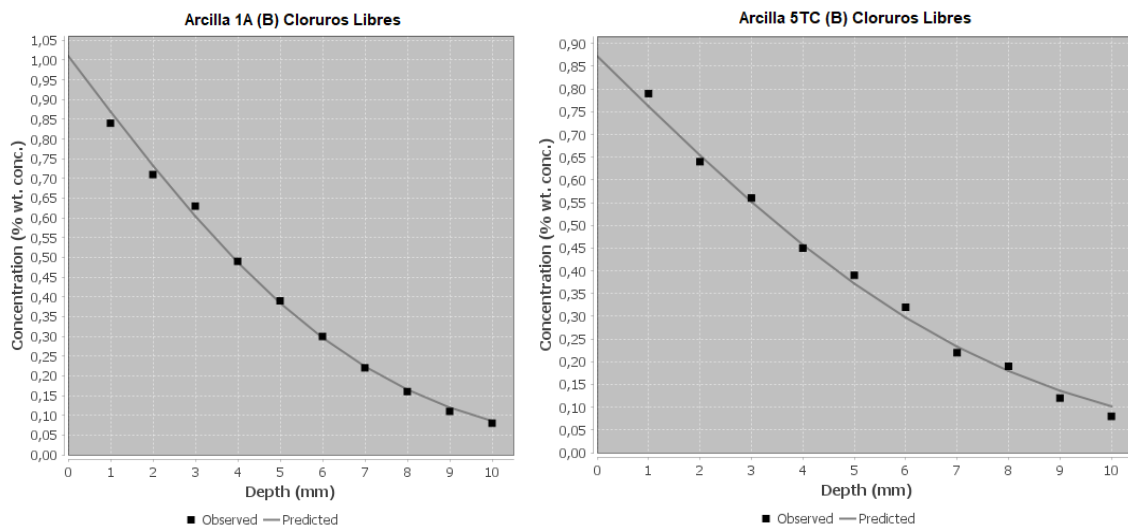


Figura 52 Perfil de difusión de cloruros libres Arcilla 1A (B) y Arcilla 5TC (B) (Autoría Propia)

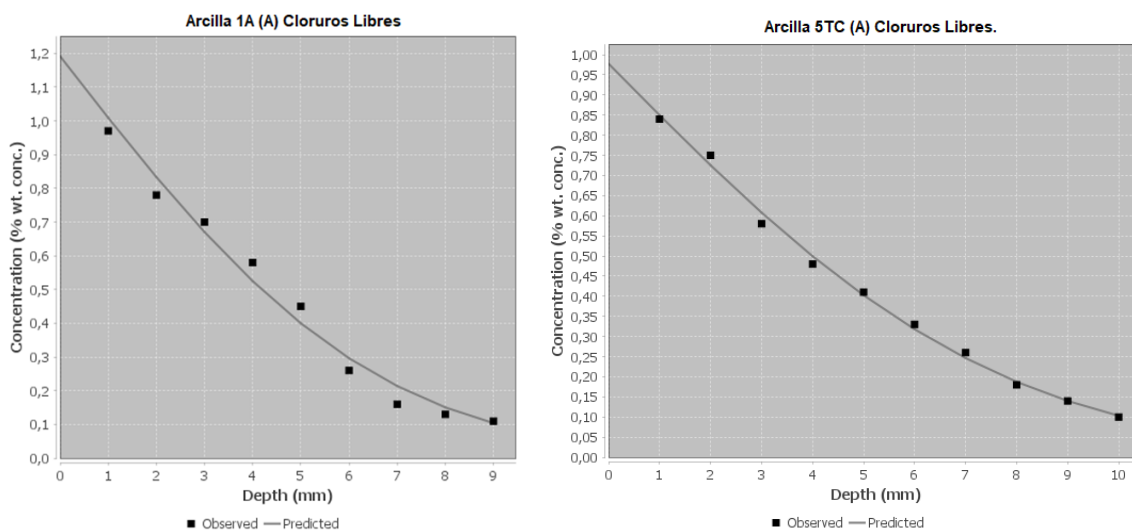


Figura 53 Perfil de difusión de cloruros libres Arcilla 1A (A) y Arcilla 5TC (A) (Autoría Propia)

Tabla 25 Coeficiente de difusión efectivo de cloruros para las Arcilla 1 A y Arcilla 5TC. (Autoría Propia)

Muestra	Coeficiente de difusión efectivo. E-12 (m ² /seg)
Arcilla 1A(A)	4,35
Arcilla 1A (B)	5,23
Arcilla 5TC (A)	5,97
Arcilla 5 TC (B)	6,35
REF A	4,01
REF B	3,81

La Arcilla 1A posee coeficiente de difusión efectivo menores que la Arcilla 5TC.

Cuando un mortero presenta tiene un coeficiente de difusión efectivo elevado, significa que el mortero presenta una alta capacidad para permitir la difusión de sustancias a través de su estructura, teniendo en cuenta tanto la difusión a través de los poros como a través de posibles micro canales o vías de transporte.

5.2.2.2.2 Cloruros combinados o totales.

CLOURUROS TOTALES = CLORUROS LIBRES + CLORUROS COMBINADOS

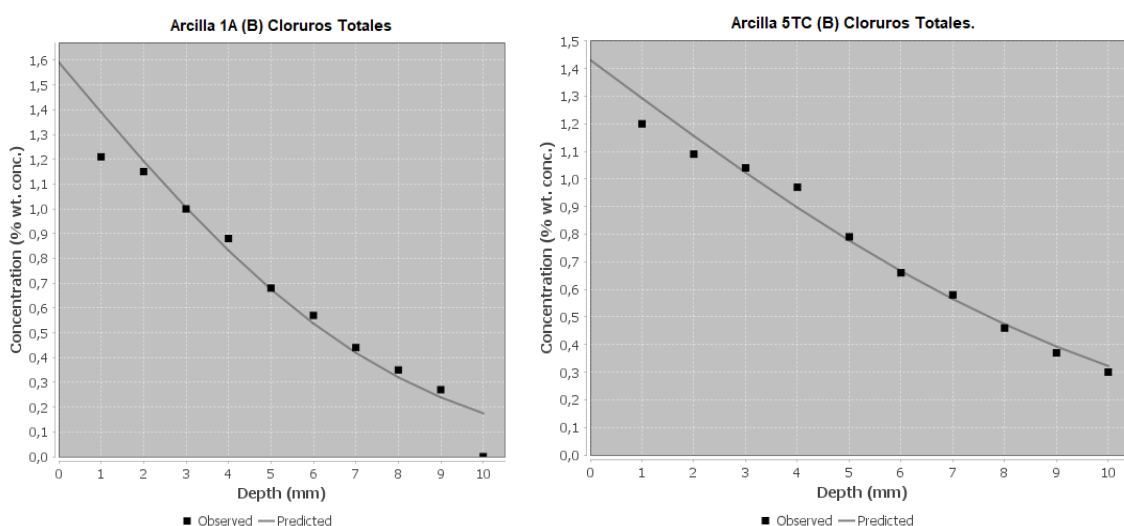


Figura 54 Perfil de difusión de cloruros totales Arcilla 1A (B) y Arcilla 5TC (B) (Autoría Propia)

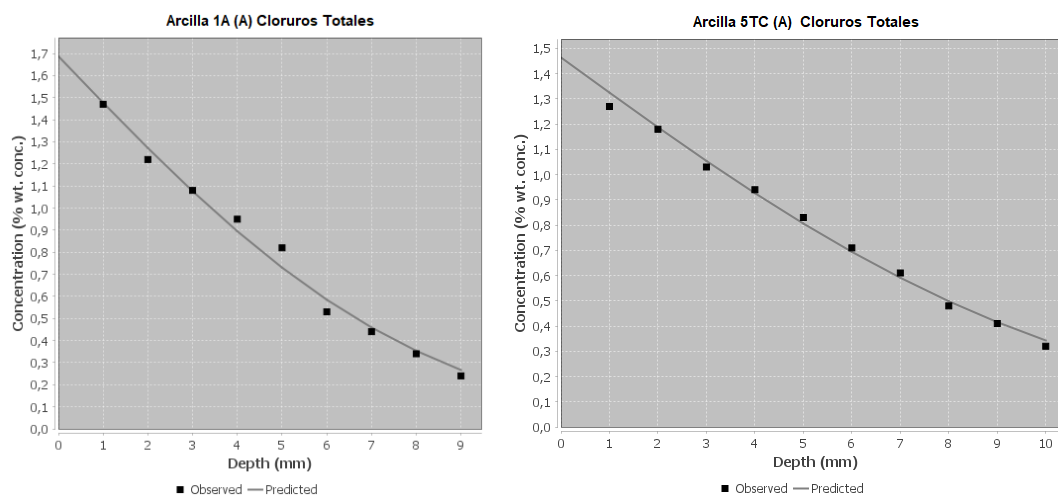


Figura 55 Perfil de difusión de cloruros totales Arcilla 1A (A) y Arcilla 5TC (A) (Autoría Propia)

Tabla 26 Coeficiente de difusión aparente de cloruros para las Arcilla 1 A y Arcilla 5TC. (Autoría Propia)

Muestra	Coeficiente de difusión aparente. E-12 (m ² /seg)
Arcilla 1A (A)	8,40
Arcilla 1A (B)	9,35
Arcilla 5TC (A)	11,40
Arcilla 5 TC (B)	11,00
REF A	9,00
REF B	7,90

La Arcilla 1A, presenta un coeficiente de difusión aparente más bajo que la Arcilla 5TC, lo que significa que posee una capacidad más baja de permitir el paso de sustancias a través de él, el coeficiente de difusión aparente se refiere a la capacidad de difundir los cloruros a través del mortero de arcilla calcinada.

Un coeficiente de difusión aparente elevado indica que el mortero de arcilla es permeable y permite que las sustancias, como el agua, los gases o los compuestos químicos, se muevan con relativa facilidad a través de sus poros o estructura en este caso cloruros por la existencia de un gradiente de concentración, que es la fuerza impulsora.

En resumen, un coeficiente de difusión aparente elevado en un mortero de arcilla indica que este tiene una alta permeabilidad y permite el paso de sustancias a través de él con mayor facilidad.

5.2.3. Carbonatación.

Tabla 27 Profundidad de carbonatación probetas morteros con Arcilla 1A y Arcilla 5TC. (Autoría Propia)

Profundidad media de carbonatación en (mm)		
Muestra	7 días	28 días
Arcilla 1A	2,2	4,3
Arcilla 5TC	3,3	0

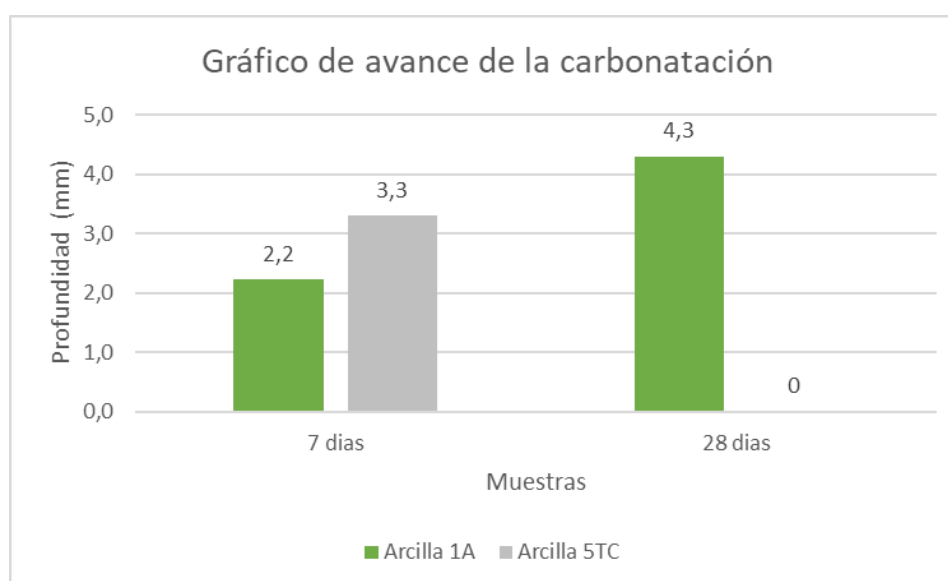


Figura 56 Evolución de las profundidades de carbonatación a 7 y 28 días para morteros con Arcilla 1A y Arcilla 5TC (Autoría Propia)

En la Tabla 27 y Figura 56 se muestran las medias de profundidad de carbonatación alcanzadas a las edades de 7 y 28 días. En ella podemos observar que la probeta correspondiente al mortero realizado con Arcilla 1A, presenta menor profundidad de carbonatación a los 7 días, mientras que el mortero elaborado con adición de Arcilla 5TC, presenta mayor avance, que hace a la Arcilla 1ª, más resistente a este fenómeno.



6. CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones parciales

1. La Arcilla fibrilar 1A presenta mejor comportamiento a la **carbonatación** que la Arcilla laminar 5TC, presentando menores valores de penetración de cloruros, lo que redundará en una mejor protección para las armaduras de refuerzo del hormigón.
2. La Arcilla 1A, presenta un **coeficiente de difusión aparente de cloruros** más bajo que la Arcilla 5TC, lo que significa que es más resistente a la penetración de cloruros muy importante para su aplicación en el diseño de materiales para estructuras expuestas a ambiente marino o de sales de deshielo. El cálculo de la vida útil en servicio sería mayor para una estructura diseñada con la arcilla 1A comparada con la arcilla calcinada 5TC.

La Arcilla 1A, presenta un **coeficiente de difusión efectivo** más bajo que la Arcilla 5TC, lo que significa que presenta una mayor tiene menor permeabilidad al agua o a otros compuestos, o sea que tiene menor capacidad para permitir la difusión de sustancias a través de su estructura, lo cual puede tener implicaciones tanto positivas como negativas dependiendo de la aplicación específica.

3. La Arcilla 1A, presenta un **coeficiente de migración**, valores de penetración máximas, e intensidad, menores que la Arcilla 5TC, lo que significa que los morteros elaborados con ella tienden a ser menos permeables y oponen mayor resistencia a la migración de cloruros a través de su estructura. Este comportamiento está de acuerdo con los resultados de difusión de cloruros.
4. Los valores de **resistividad** de ambas arcillas 1A y 5TC tienen valores similares, pero teniendo en cuenta que éste es un valor cualitativo que brinda una idea de la porosidad interconectada, los resultados deben ser asociados a los de los ensayos de migración y difusión. Influye también el hecho de que la



matriz del mortero tenga la capacidad o no de combinar cloruros en su estructura, lo que detendría el avance de los mismos.

5. En **propiedades mecánicas** el mortero elaborado la Arcilla 1A presenta unos valores de resistencia a compresión superiores a 42,5 MPa a compresión, por lo que se puede decir que la arcilla aporta la resistencia necesaria al mortero, además de hacerlo con una menor huella de carbono y siendo más sostenible. En tanto, la arcilla laminar 5TC no supera ni se aproxima los requisitos mínimos de resistencia a compresión.

6.2 Conclusiones Generales

Con la arcilla calcinada 1A se obtiene un mortero sostenible con una reducción del 45% de cemento Portland con buenas propiedades mecánicas y muy buena respuesta durable frente a agentes agresivos como cloruros y carbonatación con un comportamiento funcional muy similar a un mortero únicamente con cemento.

La arcilla 5TC es inviable para obtener morteros sostenibles con elevada reducción de cemento de acuerdo a sus propiedades funcionales (propiedades mecánicas y durables frente a agentes agresivos)

7. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION:

Encontrar la explicación de una tan diferente respuesta funcional entre la arcilla 1A y la 5TC: la respuesta se debe a la morfología o a la influencia que esta pueda tener en (fibrilar vs laminar) el mayor contenido de CaO de la arcilla 1A?

De los cloruros combinados en la arcilla 1A que % están formando parte de la Sal de Friedel? Influencia del MgO porque esta arcilla da muy buen comportamiento con poco Al_2O_3 y mucho MgO.



8. BIBLIOGRAFÍA.

Alcaraz Marín, J. (2012). Microestructura del hormigón.

(Bejarano, WV y Velásquez, WV (2020)). Comportamiento de la resistencia a la compresión de concreto F´C 210 kg/cm² con mejorado al 1.5%, 3% y 5% de fibras de cáñamo, Trujillo – 2020 (Tesis de licenciatura). Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11537/27890>

(Buitrón Lara, Daniela Mishell, and María José Ibarra Valdiviezo 2022) Buitrón Lara, Daniela Mishell, and María José Ibarra Valdiviezo . *Evaluación del aditamento de cáñamo al hormigón hidráulico para mejorar sus propiedades mecánicas en el uso de pavimento*. BS thesis. Quito: UCE, 2022.

Bonavetti, V. L. (1998). *Cementos con filler calcáreo. Mecanismo de interacción y su influencia sobre la resistencia* (Doctoral dissertation, Tesis MSc. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires).

(Carreño Cornejo, F. (2020)). Análisis técnico-económico del uso de Pet reciclado como reemplazo parcial de áridos finos en hormigones. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/> URI: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177847>.

(Código Estructural (2021)). Ministerio de Transportes, Movilidad y agenda urbana.

(CEMEX (2022)). Productos y soluciones sostenibles. CEMEX. <https://www.cemex.com/es/web/guest/sostenibilidad/futuroenaccion/productossoluciones-sostenibles>.

(Cementos Tudela Veguín, (2018)). Gama de Productos BIA. <http://www.cementostudelaveguin.com/gama-de-productos-bia/>

(Cementos Tudela , (2018))<http://www.cementostudelaveguin.com/portfolio-item/cem-i-425-r/>

CEDEX (2011) *Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias*.



(Chopra, D. y Siddique, R. (2015)). Resistencia, permeabilidad y microestructura del hormigón autocompactante con ceniza de cascarilla de arroz. *Ingeniería de biosistemas* , 130 , 72-80.

(Díaz-Hernández, D. Z. & Sarmiento-Alipio, J. A. (2020)). Concreto a base de cenizas volantes activadas alcalinamente, modificado con nanopartículas de óxido de silicio y dióxido de titanio. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia. <https://hdl.handle.net/10983/24890>

(Darío Pescador, 2022, el diario). https://www.eldiario.es/consumoclaro/hormigon-provoca-8-emisiones-mundiales-co2-alternativas-existen_1_9827092.htm.

Díaz, J., Izquierdo, S. R., Mejía, R., Gordillo, M. (2013) Mezcla ternaria de cemento Portland, escoria de alto horno y piedra caliza: Resistencia mecánica y durabilidad. *Revista de la Construcción* vol.12 no.3 Santiago dic. 2013.

(Euro news) <https://es.euronews.com/2022/12/13/acuerdo-en-la-ue-para-adoptar-un-impuesto-fronterizo-sobre-el-carbono#>

(Echeverría Santos, C. M. (2022)). Reducción de las emisiones CO2 en la producción del cemento empleando piedra calcárea y arcillas calcinadas (LC3= Limestone Calcined Clay Cement) (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., Menéndez, G., & Carrasco, M. F. (2015). Hidratación y propiedades de cemento ternarios con filler calcáreo y escoria. *Revista Alconpat*, 5(2), 84-96.

(Kishore, R., Bhikshma, V. y Prakash, PJ (2011)). Estudio de las características resistentes del hormigón de ceniza de cascarilla de arroz de alta resistencia. *Procedia ingeniería* , 14 , 2666-2672.

Kim, J., Na, S., Hama, Y. (2020) *Effect of Blast-Furnace Slag Replacement Ratio and Curing Method on Pore Structure Change after Carbonation on Cement Past.* National Institute of Technology Oyama College, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, College of Environmental Technology'.



LafargeHolcim España (2022) ECOPact. LafargeHolcim.
[https://www.lafargeholcim.es/ecopact-hormigon-sostenible'](https://www.lafargeholcim.es/ecopact-hormigon-sostenible)

(M. Sader,2019) «Por qué es urgente ABANDONAR el CEMENTO en la arquitectura,»
05 12 2019. [En línea]. Available
<https://www.revistaad.es/arquitectura/articulos/urgente-abandonar-cemento-arquitectura/24021>

Molina Bas, O. I. (2008). La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón (Doctoral dissertation, Caminos).
(Paris2015)https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_spanish_.pdf

(MA de la Rubia,2018) MA de la Rubia, E. de Lucas-Gil, E. Reyes, F. Rubio-Marcos, M. Torres-Carrasco, JF Fernández, A. Moragues, "Estudio de viabilidad de un método seguro para la salud para preparar pastas de cemento con Adiciones funcionales nanométricas", Avances en ciencia e ingeniería de materiales, vol. 2018, artículo ID 7805248, 13 páginas, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7805248>

(Perera, A. G., & Ma del Pilar Sancha Dionisio. (2016)). Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la producción de cemento. Propuesta de un modelo de evaluación. *Innovar: Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 26(60), 51–66. <http://www.jstor.org/stable/43799918>

Parada Rocha, K. A. (2022). Evaluación del desempeño de elementos estructurales prefabricados a partir de residuos termoplásticos del sector agroindustrial para soluciones de vivienda digna en el Atlántico.

(Rodger, L. (2018)). La enorme fuente de emisiones de CO₂ que está por todas partes y que quizás no conocías. BBC News. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>

RILEM TC178-TCM (2002). Recommendations of RILEM TC 178-TMC: Testing and modelling chloride penetration in concrete' Analysis of water soluble chloride content in concrete.

(Sanjuán Barbudo, M. Á., & Chinchón Yepes, S. (2014). Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland. Universidad de Alicante.



Scrivener, K., Dekeukelaere, A., Avet, F., & Grimmeissen, L. (2019). Financial attractiveness of LC3. *École Polytechnique Fédérale de Lausanne: Lausanne, Switzerland*

(NT BUILD 492. Nordtest Method (1999)) Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from Non-steady-state migration experiments. RILEM Publications SARL.

NT BUILD 443. Nordtest Method (1995). Concrete hardened: accelerated chloride penetration.

UNE-EN 12620, 2009. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2009.

UNE-EN 197-1, 2011. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2011.

UNE-EN 1015-4: 1999 Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 1999.

UNE-EN 1015-9: 1999 Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 1999.

UNE-EN 197-1. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2011.

UNE-EN 14629. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2007.

UNE-EN 196-1. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2018.

UNE-EN 12390-12. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2020.



UNE-EN 196-3, 2017 Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2018.

(Vásquez, R. (2012)). Cemento y sus aplicaciones. Cementos Pacasmayo SAA, 712.