

TRABAJO FINAL DE PROGRAMA (TFP)

PROGRAMA SENIOR

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



RECICLADO Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS VÍTREOS DE NATURALEZA CERÁMICA PROCEDENTES DEL ESMALTADO DE ACERO VITRIFICADO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. MORTEROS Y HORMIGONES

Autor: Eugenio Gómez Gómez

Junio 2022

Director de TFP: Dr. Carlos Thomas García

Trabajo realizado en: LADICIM



“La ciencia se compone de errores,
que a su vez son los pasos hacia la
verdad”

Julio Verne

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer al director de este TFP, Carlos Thomas García, por su confianza en el proyecto a desarrollar, su transmisión de conocimiento y su apoyo en la consecución de este trabajo.

En segundo lugar, manifestar mi agradecimiento a la empresa VITRINOR. S.A.L por hacer posible esta investigación con el suministro de residuo cerámico procedente de su proceso de fabricación.

Al Laboratorio de Ciencia e ingeniería de los Materiales (LADICIM) por poner las máquinas, materiales e instrumental necesario a mi disposición para realizar esta investigación.

Muchas gracias a todas las personas que han trabajado en las distintas etapas de esta investigación; amasando, realizando ensayos y analizando resultados; en especial a Gilberto García del Ángel , Pablo Tamayo Castañeda y Andrea Pellón Mendoza por su paciencia, comprensión y buen hacer. No quiero olvidarme de Eduardo Liaño Campo que comenzó conmigo esta investigación para obtener su título de Fin de Grado.

Como final, no puedo ni debo olvidarme de las personas que hacen posible el Programa Senior en la Universidad de Cantabria; el cual me ha hecho revivir mis años de estudiante y sobre todo me ha proporcionado una buena formación humanista.

Dedicatoria

A mi padre José; el cual siempre me inculco la afición por el estudio y la investigación. A toda mi familia y en especial a mi esposa M.^a Ángeles que es y ha sido la gran sufridora de mis aficiones por el estudio y la investigación; a mis hijos Pablo y Virginia y mis nietos Diego, Noa y Lola, para que entiendan en el futuro que con esfuerzo se puede conseguir lo que te propongas.

Resumen

En la jerarquía de gestión de residuos se establecen varias opciones, siendo una de las preferentes la Reutilización de dichos residuos mediante su Valorización; la cual tiene como objetivo que el residuo tenga una finalidad útil, sustituyendo a otros materiales y pasando de residuo a recurso.

El presente trabajo de investigación (Trabajo Final de Programa Senior de la Universidad de Cantabria TFP) supone una novedosa línea de investigación sobre la reutilización de residuos cerámicos de origen vítreo procedentes de la fabricación de menaje de cocina sobre acero vitrificado en la planta de fabricación de fabricación de VITRINOR S.A.L ubicada en Guriezo (Cantabria).

Para el desarrollo del trabajo se han tenido en cuenta alternativas como la sustitución de materias primas por el residuo cerámico; la incorporación del residuo como sustitutivo de cemento Portland o de áridos en la fabricación de materiales de construcción.

La línea experimental realizada, en una primera etapa ha consistido en reemplazar el cemento Portland por residuo cerámico en las dosificaciones de morteros convencionales en distintas proporciones de reemplazo y comparar sus propiedades mecánicas con morteros de control y por tanto con 0% de residuo cerámico.

La segunda línea experimental se ha realizado sobre morteros autonivelantes, utilizando varias dosificaciones mediante la sustitución de filler calizo por residuo cerámico en proporciones de reemplazo del 25% al 100%. Los resultados mecánicos a flexión y compresión de estos morteros se compararán con un mortero autonivelante patrón y se verá como estas adiciones modifican las propiedades mecánicas considerablemente, permaneciendo inalterables las características de estos morteros en estado fresco en cuanto a su escurrido.

La tercera línea experimental, ha tenido como base la fabricación de hormigones autocompactantes. Para ello se ha tenido que encontrar la dosificación correcta que permita actuar a estos hormigones como autocompactantes, mediante la adición del residuo cerámico como reemplazo total o parcial del filler calizo utilizado en la dosificación de control. Posteriormente se realizan ensayos de las distintas clases de hormigón autocompactante fabricado, tanto en estado fresco como en estado endurecido, atendiendo a las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad

Índice

Capítulo 1. Introducción y objetivos.	1
1.1 Desarrollo sostenible, economía circular y valorización de residuos.	1
1.2 Objetivos del trabajo de investigación a realizar.	5
1.3 Metodología del trabajo.	6
Capítulo 2. Estado del Conocimiento.	8
2.1. Esmalte vítreo.	8
2.1.1 Concepto del esmalte vítreo.	8
2.1.2. Breve historia del esmalte vítreo.	8
2.1.3. Componentes de un esmalte vitreo.	10
2.1.4. Formulaciones de un esmalte vítreo.	18
2.1.5. Proceso de molienda	19
2.1.6. Descarga y controles sobre la barbotina molida.	21
2.1.7. Proceso de esmaltado.	22
2.1.8. Cualidades del esmalte vítreo.	29
2.2. Generación de los residuos de esmalte vítreo objeto de la investigación	31
2.3. Cementos y adiciones.	37
2.3.1. Breve historia del cemento.	37
2.3.2. Importancia del cemento en nuestra sociedad.	38
2.3.3. Definición del cemento Portland.	43
2.3.4. Proceso de fabricación del cemento.	44
2.3.5. Problemática en la fabricación del cemento.	51
2.3.6. Adiciones y tipos de cementos.	54
2.4. Morteros y hormigones.	60
2.4.1. Morteros.	60
2.4.1.1. Desarrollo histórico del mortero.	60
2.4.1.2. Definición de morteros.	61
2.4.1.3. Clasificación de morteros.	61
2.4.1.4. Características exigibles a un mortero.	65

2.4.1.5. Dosificación y amasado de morteros.	69
2.4.2. Hormigones.	72
2.4.2.1. Breve historia del hormigón.	72
2.4.2.2. Importancia del hormigón en nuestra sociedad.	72
2.4.2.3. Definición de hormigón.	73
2.4.2.4. Diferencia entre hormigón y mortero.	73
2.4.2.5. Componentes fundamentales del hormigón.	74
2.4.2.6. Características fundamentales y comportamiento del hormigón.	75
2.4.2.7. Tipos de hormigón.	78
2.4.2.7.1. Hormigón autocompactante HAC.	84
2.4.2.8. Características de los componentes del hormigón.	86
2.4.2.9. Fabricación, transporte y puesta en obra del hormigón.	89
2.4.2.10. Ensayos exigibles a un hormigón fresco y endurecido.	90
2.5. Hormigones de protección neutrónica.	95
2.5.1. Introducción a las radiaciones.	95
2.5.2. Tipos de radiaciones.	96
2.5.3. Características de las radiaciones.	97
2.5.4. Formas de protección radiológica.	99
2.5.5. Protección frente a la radiación neutrónica.	99
2.5.6. El hormigón como escudo de neutrones.	101
2.5.6.1. Tipos de hormigón para protección neutrónica.	102
2.5.6.2. Áridos para protección neutrónica.	102
2.5.7. Dosificación de hormigón para protección neutrónica.	105
2.5.8. Aplicaciones.	106
Capítulo 3. Materiales y metodología experimental	107
3.1. Introducción.	107
3.2. Residuo de esmalte cerámico objeto de la investigación.	107
3.3. Materiales empleados en la investigación.	111
3.4 Caracterización del residuo cerámico empleado en la investigación.	114

3.4.1. Caracterización química	114
3.4.1.1. Análisis de espectrometría de dispersión de Rayos X. EDX.	114
3.4.1.2. Espectrometría MP- AES.	120
3.4.2. Caracterización física.	122
3.4.2.1. Determinación de la humedad.	122
3.4.2.2. Determinación de la densidad.	124
3.4.2.3 Determinación de la parte vítrea del residuo cerámico.	125
3.5. Diseño, fabricación y ensayos de las probetas normalizadas de morteros.	130
3.5.1. Dosificación de morteros convencionales.	130
3.5.1.1. Amasado y fabricación de probetas de morteros convencionales.	131
3.5.1.2. Ensayos sobre morteros en estado endurecido.	135
3.5.2. Dosificación de morteros autonivelantes	139
3.5.2.1. Amasado y fabricación de probetas normalizadas de morteros Autonivelantes.	141
3.6. Hormigones autocompactantes.	145
3.6.1. Introducción.	146
3.6.2. Materiales empleados.	146
3.6.3. Caracterización de los materiales empleados en la fabricación de HAC.	148
3.6.3.1. Caracterización química.	148
3.6.3.2. Caracterización física.	148
3.6.3.3. Caracterización morfológica.	154
3.6.4. Dosificación de los HAC fabricados.	159
3.6.5. Fabricación del HAC. Amasado.	160
3.6.6. Caracterización del HAC amasado en estado fresco.	161
3.6.6.1. Método de la caja en L.	162
3.6.6.2. Método del embudo en V.	164
3.6.6.3. Ensayo de escurrimiento.	164
3.6.6.4. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés.	166
3.6.7. Hormigón en estado endurecido.	168

3.6.7.1. fabricación de probetas.	168
3.6.7.2. caracterización física.	169
3.6.7.3. Propiedades mecánicas. Resistencia de rotura a compresión.	171
3.6.7.4. Durabilidad. Permeabilidad al oxígeno y penetración de agua Bajo presión.	173
3.7. Utilización del residuo cerámico como materia prima en la fabricación de Clinker del cemento Portland.	177
Capítulo 4. Resultados experimentales y análisis de dichos resultados.	179
4.1. Introducción.	179
4.2. Resultados de ensayos sobre morteros convencionales.	179
4.2.1. Morteros convencionales en estado fresco.	179
4.2.2. Morteros convencionales en estado endurecido.	181
4.3. Resultados de morteros autonivelantes	187
4.3.1. Morteros autonivelantes en estado fresco.	187
4.3.2. Morteros autonivelantes en estado endurecido.	189
4.4. Resultados experimentales de ensayos realizados sobre HAC.	193
4.4.1. Composición de los HAC a fabricar.	193
4.4.2. Prueba preliminar del HAC-C.	194
4.4.3. Fabricación del HAC-C.	202
4.4.4. Fabricación del HAC-R100.	213
4.4.5. Hormigón en estado endurecido.	226
4.4.5.1. Aspecto del hormigón endurecido.	226
4.4.5.2. Preparación de probetas.	228
4.4.5.3. Propiedades físicas.	229
4.4.5.4. Propiedades mecánicas. Ensayo de rotura a compresión.	234
4.4.5.5. Ensayos de durabilidad.	237
4.4.5.5.1. Ensayos de permeabilidad al oxígeno.	237
4.4.5.5.2. Ensayos de penetración de agua bajo presión.	241
4.5. Residuo cerámico como materia prima en la fabricación	245

de Clinker del cemento Portland.

Capítulo 5 . Conclusiones y futuras líneas de investigación. 247

5.1. Conclusiones. 247

5.2. Futuras líneas de investigación. 251

Capítulo 6. Bibliografía. 252

Índice de ilustraciones 256

Índice de tablas. 265

Capítulo 1. Introducción y objetivos

1-1. Desarrollo sostenible, economía circular, jerarquía y valorización de residuos

Durante los últimos años y sobre todo a partir de los años 70 del siglo XX, se produce un cambio de rumbo en el pensamiento económico de la época; de crecimiento económico a toda costa hacia crecimientos más respetuosos con los recursos naturales.

En 1972, se realiza uno de los primeros estudios sobre el crecimiento económico, por el Club de Roma (1) en el que se defendía el cese del crecimiento económico, proponiendo un crecimiento nulo para los países desarrollados y la imperiosa necesidad de buscar modelos alternativos de desarrollo que tuvieran en cuenta la limitación de los recursos naturales. Un segundo informe del Club de Roma (1), ya no urgía el cese del crecimiento, pero planteaba que el crecimiento por el crecimiento mismo, en el sentido numérico y de tamaño, sencillamente no podía continuar por más tiempo.

En este contexto, se comienza a hablar del Desarrollo Sostenible; pero antes de adentrarnos en este nuevo concepto, como ciudadano, me debo hacer las siguientes preguntas vitales ¿Realmente tenemos alguna alternativa? ¿Podemos sobrevivir a un desarrollo sin límites y que no sea sostenible?

El concepto Desarrollo Sostenible, es una propuesta para poder reconciliar las tres patas básicas de nuestra civilización: el crecimiento económico, el medio ambiente y la sociedad. En 1983, debido a la preocupación ambiental a escala global, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) crea la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1) y en 1987, esta comisión emite el Informe Brundtland (1); en reconocimiento al trabajo desarrollado por la primera ministra noruega Gro Harlem Brundtland, inicialmente llamado Our Common Future ó Nuestro Futuro Común.

Este documento formaliza el concepto Desarrollo Sostenible y es definido como **<< el que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades>>**. Esta definición; evidentemente cuestiona el modelo implantado de producción y consumo transformando el concepto desarrollo e incluyendo la triple vertiente: económica, social y ambiental. Figura 1.1.



social y ambiental. Figura 1.1

Todos estos conceptos quedarían materializados más tarde en la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1992) (2). Esta declaración sienta las bases para la protección del Medio Ambiente, estableciendo la conocida Agenda 21 (2). Esta Agenda sería el germen de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, fijados por la ONU en el 2000 y más reciente en el 2015, dando lugar a una nueva agenda mundial con los llamados Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales son 17, representados en la Figura 1.2 ; enumerando a continuación el objetivo que más incide entre otros en este trabajo, que es el de Producción y Consumo Responsable.



Figura 1.2. Objetivos del Desarrollo Sostenible.

Lo que no cabe duda es que existen riesgos para la sostenibilidad en el ámbito económico ya que no será posible crecer indefinidamente ya que los recursos son finitos. En el ámbito social tenemos el riesgo de la pobreza, la dependencia, el hambre, analfabetismo etc.; en el ámbito ambiental, los problemas derivados del crecimiento económico y social (crisis climáticas, acidificación de océanos, contaminación química, capa de ozono, CO₂ atmosférico, deforestación, etc.).

La Producción y Consumo Responsables; Objetivo nº 12 de los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (2), consiste en garantizar el consumo responsable y eficiente de los recursos, así como medios de producción sostenibles. Para poder lograr en un periodo de tiempo (2020-2030) un crecimiento económico y un desarrollo sostenible, es urgente reducir nuestra “Huella Ecológica” mediante un cambio en los métodos de producción y consumo de bienes y recursos. El modelo actual se plasma en una serie de desafíos que la humanidad tiene planteados a escala global (calentamiento del Planeta, contaminación, generación de basura, agotamiento de recursos naturales,

etc.) que están muy directamente relacionados con nuestro modo de vida. Esto nos lleva a hacernos una reflexión que en realidad es una aseveración **<<Para hacer frente a los desafíos globales tenemos que cambiar nuestra forma de producir y consumir>>**.

Una estrategia muy viable en la Producción y Consumo Sostenible es la Economía Circular (4) ya que esta estrategia está orientada a reducir la generación de residuos, el uso racional de los recursos naturales, fomentar la capacidad científica y tecnológica y estimular la sostenibilidad empresarial Figura 1.3.



Fig.1.3. Esquema de la Economía Circular.

El principal objetivo de la Economía Circular es **<< cerrar el círculo>>** es decir, conectar los extremos del sistema lineal, fabricantes - consumidores (empresas-personas), para aprovechar el máximo de materia transformada y fabricada, reintroduciéndolo en el sistema de producción, minimizando así los residuos hasta que sean mucho menores o inexistentes, o dicho de forma más sencilla **<<mantener a los materiales más tiempo en la economía>>**. Las grandes ventajas de la Economía Circular las podemos resumir en tres, aunque hay muchas más.

- . Los procesos de producción requieren de menor cantidad de nuevos materiales y de la extracción de materias primas.
- . Surgen innovaciones y nuevas oportunidades de trabajo.
- . Reducen el deterioro ambiental.

Un capítulo importante en el sistema de producción/consumo actual es la generación de residuos; el ciudadano medio europeo generó en el año 2016 5 tn/año (incluyendo residuos minerales) y sólo el 37,8% fue reciclado (4), con lo cual podemos afirmar que estamos desaprovechando una gran oportunidad para mejorar la eficiencia de los recursos ya que lo que no se recicla y es reintroducido en el sistema; acaba en un vertedero.

Según la Directiva 2008/98 CE y la Ley 22/2011 del Estado de España; se considera Residuo a **cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desprenderse**. Según su origen, los residuos se clasifican en: domésticos, comerciales, industriales, mineros y sanitarios.

Si nos referimos a los residuos industriales; que son los que nos interesan para este trabajo, los definimos como los **residuos resultantes de los procesos de fabricación, transformación, utilización, consumo, limpieza, mantenimiento; generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones atmosféricas**.

En 2008, el Parlamento de la Unión Europea introdujo en su legislación la Directiva citada anteriormente 2008/98 CE, una nueva Jerarquía de Residuos, en la cual indica un orden de preferencias de acciones con el fin de reducir y gestionar los residuos.



Figura 1.4 Jerarquía de gestión de residuos.

En el **Artículo 4** de esta Directiva, se establece esta jerarquía en 6 etapas que los Estados miembros de la UE deben aplicar. La opción preferente es la Prevención de los residuos, seguida de la Valorización en su triple vertiente de Reutilización, Reciclaje o Recuperación energética. La última opción será la eliminación segura de los residuos en vertederos.

La Prevención es un conjunto de medidas que se deben adoptar en la fase de concepción y diseño, de producción, de distribución y de consumo de una sustancia, material o producto, para minimizar las cantidades de residuos mediante su reducción.

La Valorización, es la operación cuyo resultado principal es que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales que, de otro modo, se habrían utilizado para cumplir una función particular; es el paso del residuo a recurso. Así, la Reutilización consiste en aprovechar el residuo para las mismas aplicaciones que tenía cuando se encontraba en su vida útil, mediante una serie de tratamientos.

La valorización energética, consiste en aprovechar el contenido energético de los residuos y subproductos mediante combustión. Este sistema tiene un gran potencial, pero no debe ser la opción preferida ya que incluye la incineración que supone emisiones atmosféricas, a veces altamente contaminantes para la salud (dioxinas) y evidentemente gases de efecto invernadero.

Una opción muy viable industrialmente es la Valorización mediante el Reciclado, ya que el residuo es devuelto a la economía como materia prima secundaria. El Reciclado es toda operación de valorización, mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con finalidad original como en cualquier otra finalidad.

1-2. Objetivos del trabajo de investigación a desarrollar

Una vez que la industria genera un residuo; nos tenemos que preguntar en primer lugar ¿Como puede ser este aprovechado? La respuesta es inmediata; **el paso de residuo a recurso** mediante el **arte de aprovechar lo inútil**.

Utilizando residuos o subproductos no sólo tratamos de abaratar costes, sino también obtenemos un valor añadido mediante la valorización de residuos; los cuales de otra forma acabarían en el mejor de los casos con una correcta gestión por un gestor autorizado o por un simple abandono de los residuos y en ambos casos, su destino final es un vertedero, lo que implica la consiguiente degradación medioambiental.

Para alcanzar este reto de valorización de residuos de esmaltes vítreos; surgen varias alternativas a desarrollar, como son la sustitución de materias primas o la incorporación del residuo mediante adiciones a la producción de materiales construcción (morteros y hormigones) en sustitución parcial del cemento Portland o de los áridos que entran en sus composiciones.

Esta línea de investigación de nuevos materiales cementantes, está tomando un importante auge ya que la simple sustitución; total o parcial, del cemento Portland minimiza tanto las emisiones de gases contaminantes como un considerable ahorro energético añadido, en tanto que la sustitución de áridos supone una disminución de las actividades extractivas en canteras.

Téngase en cuenta que la industria cementera; de la cual se obtiene el clinker, el cual mediante adiciones de yeso (sulfato cálcico hidratado) obtenemos el cemento Portland; es una industria altamente contaminante debido a la explotación de recursos naturales (canteras), emisiones a la atmosfera de grandes cantidades de gases causantes del efecto invernadero y por consiguiente del calentamiento global del planeta (CO_2 , SO_2 , NO_x). Las emisiones de CO_2 , son debidas principalmente a la descarbonatación de la caliza (CO_3Ca) obteniendo CO_2 y óxido de calcio (CaO); siendo este óxido de calcio una de las materias primas del clinker.

A nivel mundial, se maneja el dato que el 6-7% de las emisiones de CO_2 son debidas al sector cementero (5). Este % coincide plenamente con los datos de la Tabla 1 de emisiones de CO_2 por actividad industrial. Fuente The IPPC- Special Report on Carbon Dioxide. Capture and Storage 2005 (5).

En Tabla 1, se indica que la producción de cemento en el año 2005, a nivel global, emitió a la atmosfera 932 Mt CO₂/año, lo que representa un 6,9 % del total y en nuestro país en 2018, las industrias cementeras emitieron más de 15 Mt de CO₂.

Bajo esta perspectiva del problema de la utilización y/o fabricación del cemento Portland; cualquier aportación que hagamos a su menor consumo, irá en beneficio tanto ambiental como económico.

Tabla1. Grandes fuentes inmóviles de emisiones de CO₂ a nivel mundial, con emisiones de más de 0,1 Mt CO₂/año.

Proceso	Numero de fuentes*	Emisiones Mt CO ₂ / año
Energía	4.942	10.539
Producción de cemento	1.175	932
Refinerías	638	798
Industria del hierro y acero	269	646
Industria petroquímica	470	379
Procesamiento petróleo y gas	No disponible	50
Otras fuentes	90	33
Bioetanol y bioenergía	303	91
Total	7.887	13.466

*Fuente: Número de centros por actividad industrial emisores de CO₂.

El residuo de esmalte vítreo con el que se va a trabajar básicamente está compuesto de altas cantidades de SiO₂ (>30 %) y diversos óxidos metálicos de Na, K, Mg, Al, Ti; conteniendo también importantes cantidades de Boro, superiores al 15%.

El objetivo principal de **este proyecto de investigación** es estudiar la viabilidad de empleo de estos residuos de esmaltes vítreos como sustitutivos totales o parciales de cemento Portland y áridos, tanto en morteros como en hormigones y la posibilidad de utilización en hormigones especiales como los de protección radiológica, debido a la capacidad que tiene el Boro en la absorción de neutrones.

También; esta investigación, **que propone** el reciclaje de residuos de esmaltes vítreos, será pionera en este tipo de residuos ya que no se ha investigado este campo de trabajo de estos residuos.

1.3. Metodología del trabajo

Para alcanzar los objetivos propuestos, la investigación tendrá varias fases de trabajo, las cuales se exponen a continuación.

Fase 1. Caracterización de los residuos. El objetivo de esta fase es caracterizar los residuos cerámicos de esmalte vítreo en sus tres formas de estado (polvos, fangos y

tortas de filtrado); tanto física como químicamente, conociendo su composición tanto cualitativa como cuantitativa, así como su homogeneidad.

Fase 2. Ensayos de puzolanicidad del residuo, mediante reemplazo de cemento Portland en la fabricación de morteros convencionales. Se analizará su fraguado y endurecimiento y se realizarán ensayos de resistencia mecánica de flexión y compresión, con las probetas fabricadas a los 7 y 28 días, comprobando el resultado de los ensayos en probetas con varias relaciones de cemento/residuo.

Fase 3. Ensayos en morteros autonivelantes, utilizando el residuo cerámico como reemplazo de árido fino. Se analizará su fraguado y endurecimiento y se realizarán ensayos de resistencia mecánica de flexión y compresión, con las probetas fabricadas a los 7 y 28 días, comprobando el resultado en las distintas dosificaciones de reemplazo de residuo cerámico/árido fino.

Fase 4. Ensayos con hormigones autocompactantes, utilizando el residuo cerámico como reemplazo de finos en los materiales de adición. Se harán distintas dosificaciones y se caracterizarán en estado fresco como endurecido, comprobando sus características físicas, mecánicas y de durabilidad; en comparación con un hormigón de control.

Fase 5. Utilización del residuo como materia prima en la fabricación de Clinker de cemento Portland, debido al alto contenido del residuo de SiO_2 y otros óxidos asimilables a la composición del clinker.

Fase 6. Ensayos sobre hormigones de protección radiológica aprovechando el alto contenido de Boro que contiene el residuo cerámico.

Capítulo 2. Estado del conocimiento

2.1 Esmaltes vítreos

En este punto se hace un repaso de la tecnología tanto del esmalte vítreo como del esmaltado y más concretamente del esmalte vítreo sobre acero, también llamado acero vitrificado.

2.1.1 Esmalte vitrificado

En primer lugar, se tiene que recalcar la diferencia entre un esmalte vítreo y otros recubrimientos, impropriamente llamados esmaltes y más concretamente los poli-esmaltes o lacas; los cuales son recubrimientos de naturaleza orgánica, polimerizados a temperaturas inferiores a 450°C y cuya superficie no es vítrea. Las superficies vítreas tienen una temperatura de sinterizado por encima de los 800°C y son totalmente inorgánicos. Entre estos poli-esmaltes o lacas hay muchos y variados y entre los más socorridos podemos citar: Poliéster-Siliconas, Siliconas, Polieter- Sulfona, etc.

Realizada esta primera observación; se define el esmalte de la siguiente forma [6] **“Un esmalte, es una masa que se ha solidificado en forma de vidrio, mediante fusión o sinterizado, de composición inorgánica y fundamentalmente integrada por óxidos que se han fundido sobre piezas metálicas”**. Otra definición, más sencilla y ajustada a la realidad, la cual, aunque tiene muchos años sigue estando vigente, es la dada en la Enciclopedia de Química Industrial Ullmann [7] y que define al esmalte **“Como las masas vítreas, fusibles y coloreadas o no por óxidos metálicos y fijados mediante fusión sobre metales”**. La palabra vítreo, se deriva del latín “vitreum” que significa “vidrio”.

2.1.2 Breve historia del esmalte

Es esmalte, para embellecer y proteger obras de cerámica o fabricar joyas, es conocido desde tiempos de los egipcios. Posteriores civilizaciones; fenicios, griegos, romanos, también se interesaron por estas técnicas de embellecer objetos. En Oriente, también tuvieron gran importancia ornamental en la cultura de China, de la cual pasó al Japón y fue precisamente en Japón donde el esmaltado en Oriente tuvo mayor arraigo.

Durante la Edad Media, el esmalte vivió una época de esplendor, durante los imperios bizantinos y carolingios, empleándose en la decoración de joyas, cerámicas y objetos litúrgicos principalmente, destacando en Europa los esmaltes de Limoges.

Más moderno que el esmaltado decorativo, es el esmaltado industrial de utensilios de hierro; principalmente de hierro forjado por varias razones en las que el esmalte jugaba un papel fundamental; proteger al hierro de la corrosión y ornamental del objeto esmaltado.

Estas técnicas tuvieron gran aceptación en Alemania entre 1815 y 1820, en 1822 se implantó en Austria, en Inglaterra entre 1836 y 1846 y en Francia en 1840 [8].

Un gran paso para el esmaltado industrial fue dado por la industria siderúrgica, mediante avances en los procesos siderúrgicos, permitiendo la fabricación de chapas de acero de diferentes espesores mediante la introducción de la laminación [6]. Sin embargo, no solo contribuyeron la mejora de los procesos siderúrgicos, sino que también fueron necesarios los perfeccionamientos de los hornos de cocción y las instalaciones de molienda. Estos nuevos desarrollos estaban bastante consolidados en la primera década del siglo XX y ello dio origen a una gran proliferación de industrias de diversos fabricantes de acero vitrificado, con gran cantidad de utensilios que ofrecer al mercado. En 1939, en Alemania existían 360 instalaciones de esmaltado [6] y también había instalaciones importantes en Francia e Inglaterra. Durante el siglo XX se han llegado a esmaltar más de 100 productos diferentes entre los que podemos citar: menaje, platos, paneles de arquitectura, intercambiadores de calor, estufas, neveras, cocinas, etc.

A partir de los años 90, con la aparición en el mercado de nuevos materiales y recubrimientos; objetos que eran fabricados en acero vitrificado fueron cambiados a esos nuevos materiales, plásticos principalmente, lo que supuso una importante disminución de fabricantes de acero vitrificado en el mundo. No obstante, en la actualidad siguen existiendo instalaciones de acero vitrificado en muchos países: España, Alemania, Austria, Bélgica, Rusia, Ucrania, Republica Checa, Serbia, Turquía, Rumania, Bulgaria, Polonia, China, Taiwán, India, México, Colombia, Ecuador, Brasil, Nigeria, etc.

En España, a principios del año 2000, existían 5 grandes instalaciones a nivel mundial, pero desgraciadamente solo quedan en la actualidad tres fabricantes de acero vitrificado; 1 en La Rioja y 2 en Cantabria. Las 2 cántabras son las empresas del GRUPO VITRINOR: VITRISPAN y VITRINOR.

VITRINOR, se dedica a la fabricación de menaje de cocina con una amplísima gama de productos y colores Figura 2.1 y VITRISPAN se dedica a la fabricación de paneles de arquitectura destinados a recubrir túneles de carretera, estaciones de metro, fachadas de edificios, quirófanos de hospital, estaciones de autobuses y ferrocarril Figuras 2.2 y 2.3.



Fig. 2.1. Menaje de cocina fabricado por VITRINOR.



Fig. 2.2. Paneles estación de ferrocarril

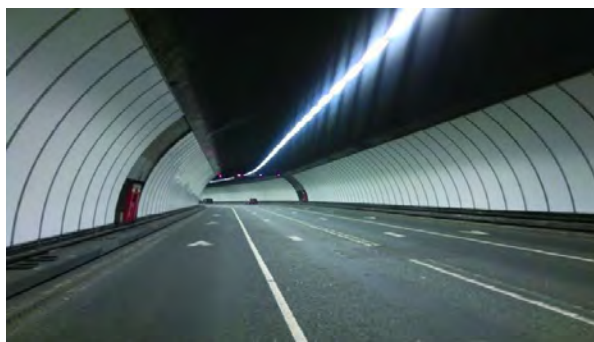


Fig. 2.3. Paneles túnel de carretera.

2.1.3 Componentes de un esmalte vítreo

El conjunto de componentes de un esmalte vítreo son aquellas sustancias que forman la llamada formula de molienda, las cuales son introducidas en un molino de bolas y son molturadas durante un tiempo determinado, el cual dependerá del tipo de suspensión de esmalte a conseguir; esta suspensión es lo que se denomina barbotina. Los componentes de un esmalte son tres: Frita+ Agua+ Agentes de suspensión; de los cuales se habla a continuación.

Frita. La frita es el material cerámico y fusible, siendo el componente principal de todos los esmaltes vítreos. Es el material que resulta de un proceso de fundido de una mezcla de materias primas a temperaturas de 1350°C- 1500°C. Se fabrica fundiendo a temperaturas superiores a 1350°C; materiales inorgánicos, tales como bórax, sílice, sosa, feldespato, criolita, junto con diversos óxidos metálicos [8].

Su proceso de fabricación consiste en el pesado, dosificación y mezclado de las materias primas, las cuales dependen del tipo de frita a fabricar. Posteriormente mediante sistemas neumáticos son introducidas las materias primas en el horno de fusión.

Durante el sangrado del horno, el material fundido sale en una lámina continua que va pasando por unos rodillos refrigerados por agua y este cambio brusco de temperatura hace que se convierta en un material sólido y fragmentado. En Figuras 2.4 y 2.5 se representa el proceso de fabricación de fritas y el estado de la frita en forma de escamas una vez refrigerada en los rodillos.

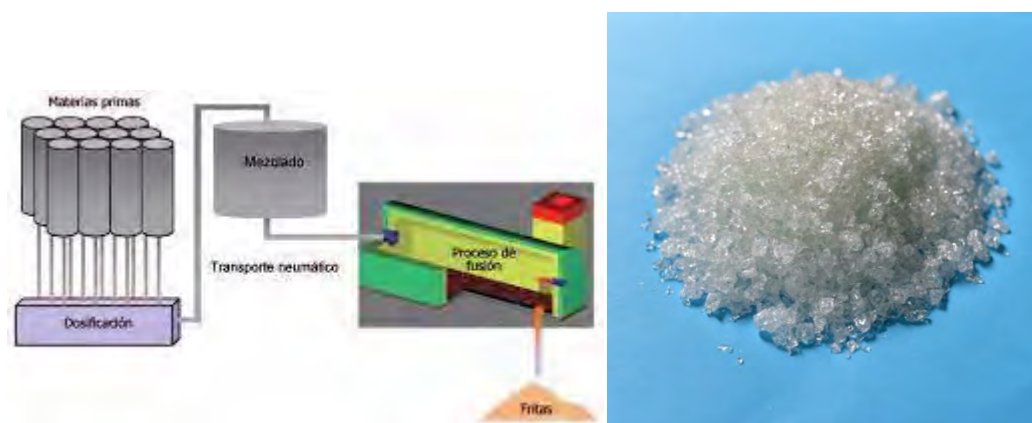


Fig.2.4. Fabricación de fritas y Fig.2.5. Escamas de frita (www.anffecc.com/es/fritas).

Según la Asociación Nacional de Fabricantes de Fritas, Esmaltes y colores Cerámicos (ANFFECC), **“una frita es una mezcla de sustancias químicas inorgánicas obtenida por enfriamiento rápido de un fundido, que es una combinación compleja de materiales, convirtiendo las sustancias químicas así elaboradas en compuestos vítreos insolubles que se presentan en forma de escamas”**.

Las fritas se dividen en varias clases según el tipo de esmaltes finales que queramos obtener. En Figura 2.6 se representan las diferentes clases de fritas.

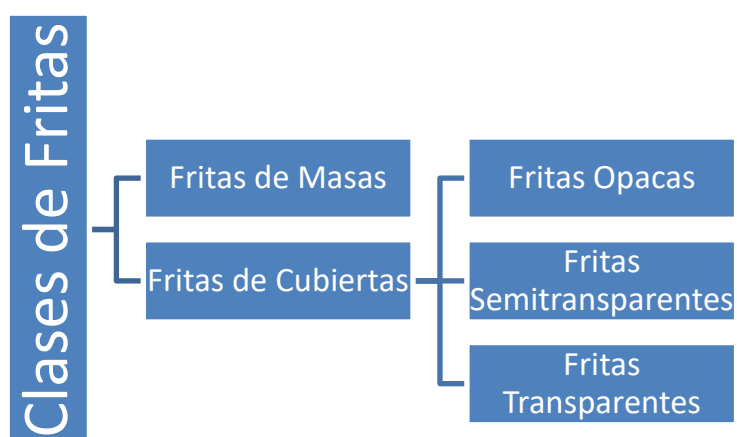


Fig. 2.6. Esquema de las diferentes clases de fritas.

La frita de masa [9] también es conocida como frita de fondo o frita de fundente porque forma parte de los esmaltes de fondo; siendo su misión principal asegurar la unión sólida entre la chapa de acero y el esmalte, es decir conseguir la adherencia con la chapa de

acero. Esta y no otra es la misión fundamental de este tipo de fritas, dejando en segundo plano otros aspectos como la resistencia química ya que normalmente encima del esmalte de base una vez sinterizado se aplica una segunda capa de color que se vuelve a sinterizar; proceso llamado de 2 capas/ 2 fuegos por las dos cocciones. A veces; es técnicamente posible, conseguir un esmaltado de fondo definitivo y en estos casos no solo se debe tener en cuenta la adherencia sino también cuidar otros aspectos como el color y la resistencia química (resistencia a los ácidos y álcalis); obteniendo una muy limitada gama de colores oscuros (gris, marrón, azul oscuro y poco luminoso) debido a los óxidos de Co y Ni que componen este tipo de fritas.

Como se ha dicho anteriormente; estas fritas tienen como misión crear adherencia entre la chapa de acero y el esmalte durante el sinterizado del esmalte. Este proceso es muy complejo y lo podemos resumir en tres fases: La primera fase es la de formación de FeO por oxidación del hierro, la segunda es de disolución del FeO formado en el esmalte y la tercera etapa consiste en la reacción de los óxidos de Co y Ni cuando todo el FeO esta disuelto.

A continuación, en la Tabla 2 se exponen algunas composiciones de fritas de fondo, expresando sus composiciones en % en peso [6].

Tabla 2. Componentes de fritas de masa.

Sustancia	Frita A	Frita B	Frita C	Frita D	Frita E	Frita F
Bórax	32,0	38,0	34,7	34,4	30,0	40,0
Feldespató	16,0	16,5	25,5	22,6	29,0	20,0
Cuarzo	32,0	26,0	26,1	24,7	20,0	22,0
Espato Flúor	4,5	5,0	3,4	3,4	8,0	4,0
CO ₃ Na ₂	9,6	10,0	7,7	10,9	7,5	8,0
NO ₃ Na	4,7	2,5	1,7	3,3	5,0	3,5
Oxido Cobalto	1,0	0,7	0,5	0,3	0,5	0,5
Oxido Níquel	0,2	1,3	0,4	0,4	0,2	2,0

Las fritas de cubierta las podemos agrupar en tres grandes grupos: opacas, semitransparentes y transparentes. Se llaman de cubierta porque forman parte de los esmaltes que se aplican encima del esmalte de fondo y es el color que nosotros vemos. Al hablar de fritas de cubierta es obligado hablar de colores y de las condiciones que se deben cumplir para obtener estos colores. Si queremos obtener colores blancos o pastel trabajaremos con fritas opacas, que en el caso de blancos tienen en la propia frita fundido el TiO₂; si queremos obtener colores moderados utilizaremos fritas semiopacas a base de óxidos de Zr y Sb y si queremos obtener colores fuertes trabajaremos con fritas

transparentes cuyos colores se obtienen con la adición de colorantes inorgánicos (1-5%) en el proceso de molienda del esmalte.

Agua. El agua es otro de los componentes básicos de un esmalte para su aplicación en húmedo sobre chapa de acero. Hace años; al agua no se le prestaba importancia en cuanto a su pureza para el esmaltado y existía una norma general no escrita que decía “Toda agua apropiada para el consumo humano era válida para el esmaltado”. Esta regla, es verdad, pero no en todos los casos; para consumo humano se tolera en SO_4^- un máximo de 400 mg/l y para el esmaltado se recomienda un máximo de 105 mg/l [8 y 9].

Como se ve, esta regla que hemos citado anteriormente sobre el tipo de agua a utilizar no es del todo correcta y ello ha inducido a no pocos errores a los esmaltadores, buscando la fuente de sus problemas de defectología en otros compuestos que no fueran el agua. En realidad, se empezó a tomar conciencia de la importancia de la pureza del agua en la década de 1970, cuando tras muchas investigaciones y comunicaciones en congresos, se dividieron las aguas para esmaltar en tres grandes grupos representados en la Figura 2.7.

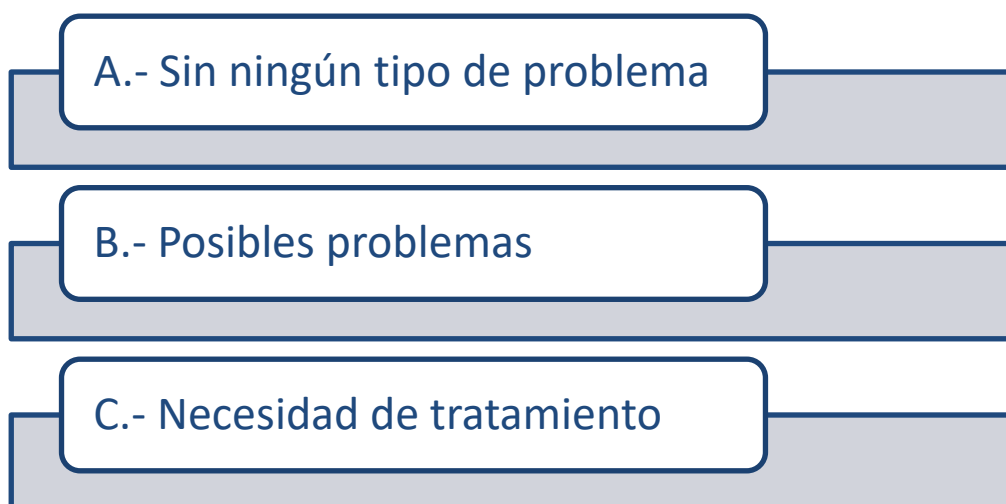


Fig.2.7. Tipos de aguas para el esmaltado.

Esta división de las calidades del agua para el esmaltado se realizó en base a parámetros químicos según la Tabla 3 donde se expresan concentraciones máximas en mg/l según la clase de agua [9]

Tabla 3. Concentraciones máximas de cada clase de agua en mg/l.

Clase	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	Cl ⁻	CO ₃ H ⁻	Sólidos totales	Dureza ° F	Dureza ° A	Dureza ° I	PH
A	31,0	7,5	25,0	13,0	117,0	147,0	55,7	30,8	38,5	7,6
B	43,0	10,0	102,0	18,0	86,0	198,0	76,8	42,4	53,0	7,5
C	53,0	18,0	105,0	18,0	78,0	284,0	102,9	56,8	71,0	7,3

En Tabla 4, se indican la correspondencia de los grados de dureza °I (Ingles), °A (Alemán), °F (Francés) y sus unidades [9].

Tabla 4. Unidades de dureza de aguas y su correspondencia entre ellas.

Correspondencia	°I =10 mg/0,1l CO ₃ Ca	°F = 10 mg/l CO ₃ Ca	°A = 10 mg/l CaO
°F	0,69	--	0,56
°A	1,25	1,78	--
°I	--	1,43	0,80

A la vista de estas tablas se ve claramente que tipo de agua es de buena calidad para el esmaltado y caso de no ser de calidad apropiada, que debemos hacer para que sea utilizada dicha agua.

El agua que tenga un análisis en el cual las concentraciones sean iguales o menores a los valores A, no tendrá ninguna dificultad para el proceso de esmaltado. El agua con concentraciones intermedias entre A y B se recomienda su empleo y es muy fácil que no tengamos dificultades. Si las concentraciones están entre B y C es peligrosa y debemos desmineralizarla. Si los valores son mayores de C, tenemos que desmineralizarla.

Según la dureza del agua, el comportamiento de la barbotina de esmalte es distinto ya que afecta a su reología. Un agua dura da una mala suspensión en el esmalte, con lo cual es necesario añadir cantidades importantes de agentes de suspensión para obtener una reología adecuada; por el contrario, un agua blanda da una suspensión alta de barbotina, con lo cual debemos añadir menos agentes de suspensión en la molienda o añadir floculantes como el Pirofosfato tetra sódico a la hora de preparar la barbotina para hacer producción de piezas.

El agua en el esmalte es el responsable de la densidad de la barbotina, normalmente en los esmaltes de base se trabaja con una densidad de 1,70 g/cm³ y en los de cubierta con 1,80-1,85 g/cm³.

Otros componentes del esmalte. Estos que se enumeran a continuación, son sustancias que son añadidas junto con la frita y el agua en la formulación del esmalte en el momento de carga y molturación en molinos de bolas y/o al esmalte una vez molido para su acondicionamiento antes de salir a producción.

Arcilla. Químicamente son silicatos hidratados de alúmina $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Se utilizan en la formulación del esmalte debido a sus propiedades de suspensión y para dar fortaleza al bizcocho (esmalte seco). Para ver la importancia de la arcilla en una formulación de esmalte hay que decir que, si no introducimos la arcilla en esa formulación, ocurre que la frita molida y el agua no se mezclan ya que la arcilla crea las condiciones para que la frita y el agua estén formando una suspensión. Normalmente se usan en proporciones del 3-10 % con relación siempre a la frita, siendo lo más normal un 7 %.

Las arcillas gruesas dan consistencias bajas y se obtienen escurridos suaves; generalmente se emplean en los esmaltes de base a los cuales se les añade un 0,5% de arcillas finas. Estas arcillas finas dan consistencias altas, lo que no permite muchas adiciones de electrolitos y su proporción suele ser del 3-5 % con relación a la frita; se emplean en los esmaltes de cubierta. No es conveniente abusar mucho de las arcillas en las formulaciones de esmalte ya que pueden originar disminuciones de resistencia química de la superficie vitrificada (menor resistencia a los ácidos) y pérdidas y pérdidas de brillo de la superficie vítrea sinterizada.

Bentonita. Es una arcilla coloidal, muy fina y mucho más efectiva que la arcilla como agente de suspensión, pero actúa muy negativamente en el brillo de la superficie vitrificada. Se emplea en la formulación con cantidades bajas de bentonita, entre el 0,25-1 % con relación a la frita.

Cuarzo. Químicamente es SiO_2 , es un material refractario y es la sustancia que interviene en mayor cantidad entre todos los componentes de un esmalte. Forma parte de las fritas y también es añadido en las formulaciones de esmaltes. En los esmaltes de base sirve para aumentar el rango de cocción, evitar quemados durante la cocción, facilitar el desgasificado de la chapa y rebajar el costo de la fórmula de esmalte debido a su bajo precio. En el esmalte de base se suele emplear en la formulación en cantidades del 10-20% con relación a la frita. Para esmaltes de cubierta la proporción suele ser del 1-3 %.

Bórax. Químicamente es tetra-borato sódico deca-hidratado $\text{B}_4\text{O}_7\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; se presenta en cristales incoloros que con el aire pierden el agua y se vuelven blancos. El ácido bórico que aporta el bórax tiene la propiedad de disolver los óxidos metálicos. Debido a esta propiedad, el bórax es un componente esencial en los esmaltes de fondo ya que disuelve las impurezas en forma de óxidos de la chapa de acero. También el bórax forma parte de las formulaciones de los esmaltes de base, mediante adiciones en molienda del 0,1-0,4 % con relación a la frita.

Nitrito Sódico. Químicamente es NaNO_2 ; polvo blanco y amarillento e higroscópico. Se emplea en las formulaciones de base para aumentar la consistencia de la barbotina y evitar oxidaciones. Se suele emplear al 0,1% sobre la frita.

Pirofosfato Sódico. Químicamente es $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, polvo granular blanco y se suele emplear para rebajar la consistencia de la barbotina ya molida, antes de salir a producción en proporciones del 0,1-0,2 %.

Carbonato Potásico. Químicamente es K_2CO_3 y se emplea tanto en formulación como en acondicionamiento de la barbotina ya molida para aumentar la consistencia de los esmaltes de cubierta; va muy bien en los blancos, azules, pero en aquellas formulaciones que contengan pigmentos de Cd (rojos) produce muchos defectos en las superficies vitrificadas.

Carbonato de Litio. Químicamente es Li_2CO_3 . Se emplea en formulación para disminuir el rango de cocción de un esmalte y sobre todo en aquellas formulaciones de bajo punto de fusión.

Aluminato Sódico. Químicamente es NaAlO_3 y se suele emplear tanto en formulaciones como en la preparación de la barbotina molida para aumentar la consistencia de los esmaltes de cubierta, principalmente en los blancos.

Todos estos componentes; NaAlO_3 , K_2CO_3 , $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, NaNO_2 , son los llamados electrolitos ya que son sales que se ionizan con el agua y sus iones actúan sobre las arcillas para modificar las características reológicas de las barbotinas.

Urea. Químicamente su fórmula es $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, es decir una amino-metano-amida. Se emplea añadiendo a las barbotinas molidas en el momento de salir a producción y su misión es dar dureza al bizcocho (esmalte seco) para no producir roturas durante la manipulación de las piezas esmaltadas y para evitar que la capa de esmalte se agriete durante el proceso de vitrificado. Solo se emplea en los esmaltes de cubierta y la adición se realiza poco antes de la aplicación de la capa de esmalte ya que la urea se descompone fácilmente desprendiendo NH_3 y CO_2 .

Opacificantes. El más empleado es el óxido de titanio TiO_2 que puede venir ya en las fritas fundidas o se le incorpora en las formulaciones. Se emplea en los colores blancos y pasteles.

Pigmentos o colorantes. La luz es una radiación electromagnética producida por una fuente luminosa y que es transmitida en diferentes longitudes de onda, formando un espectro. La parte visible de este espectro es la que se encuentra en longitudes de onda de 390 – 700 nm. Todas estas radiaciones, provocan en el ojo humano, diversas impresiones de color que percibimos; así el violeta lo percibimos con una longitud de onda de 390 nm, el azul con 450 nm, verde con 520 nm, amarillo con 570 nm y rojo con

610 nm. Estos 5 colores son los llamados colores espectrales, representados en la Figura 2.8.

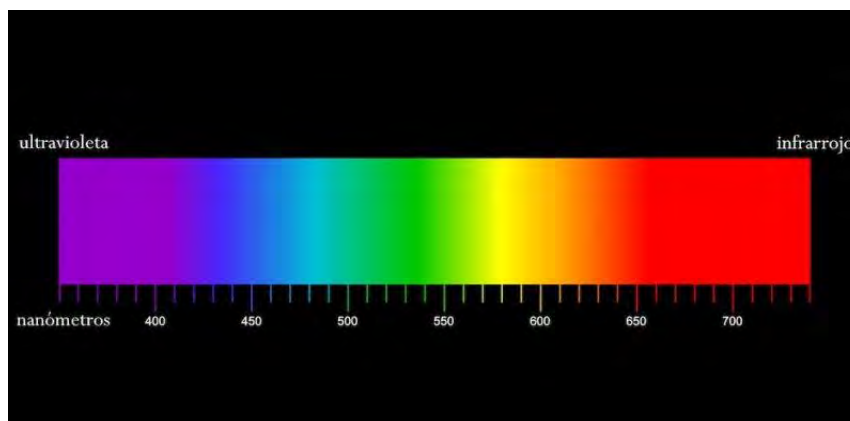


Fig. 2.8. Espectro electromagnético de la zona visible (cienciadehoy.com/el-espectro-visible-longitudes-de-onda-y-colores).

Para que un cuerpo aparezca con color, debe tener por lo menos en un ámbito de longitud de onda del espectro una absorción de luz. Estas absorciones de luz las acusan los iones de metales pesados como el Co, Ni, Cr, Cu, Mn, Fe [10].

Dicho esto, los colorantes generalmente son óxidos y sales de cationes metálicos y cuya misión es producir diferentes colores con las fritas durante el proceso de vitrificado en un intervalo de temperaturas de 800 – 850 °C. Estos óxidos pueden incorporarse o bien directamente durante la fabricación de fritas o durante la formulación del esmalte para el proceso de molienda. La proporción de colorante en las formulaciones suele ser como máximo del 7 % ya que en ese momento se dice que el color está saturado; es decir, por mucho colorante que añadamos no varía el color. Lo más normal oscila entre el 1 – 3 % de colorante con relación a la frita.

Estos colorantes deben reunir una serie de condicionantes para obtener un buen resultado de la superficie vitrificada: Ser estables, resistir bien las temperaturas de cocción y distribuirse bien en la masa de esmalte.

La mayoría de los colorantes utilizados en el esmalte vítreo se obtienen por calcinación con intervalos de temperaturas de 900 – 1300 °C, durante varias horas. Una vez acabada la calcinación, los productos resultantes son molidos en húmedo para eliminar las sales solubles en agua y posteriormente pasan a un proceso de secado.

La preparación de colores en el esmaltado es una tarea laboriosa y siempre comienza en el laboratorio con diversas formulaciones de aproximación al color deseado, en molinos de 100 g y que luego se pasaran a molinos industriales; este proceso es el llamado de igualación del color. Estas igualaciones deben cumplir unos requisitos para poder tener éxito en producción: Poder de cubrición, Estabilidad y Resistencia a la cocción. Estos requisitos en gran medida vienen dados por la elección del colorante y la

frita compatible ya que, dependiendo de la frita escogida, se desarrollará bien o mal el color.

En Tabla 5, se incluye el comportamiento de diferentes colorantes con fritas de fondo, opacas y transparentes.

Tabla 5. Desarrollo de distintos colorantes en distintas fritas.

Composición	Color	Frita de fondo	Frita opaca	Frita transparente
Oxido Co – Cr	Azul turquesa	+	-	+
Oxido Fe-Cr-Zn	Pardo	+	-	+
Oxido de Cr	Verde	-	-	+
Oxido Ti-Sb-Ni	Amarillo	-	+	-
Sulfuro de Cd	Rojo	-	-	+
Oxido Ti-Sb-Co	Crema	-	+	-
Oxido Cu-Cr-Fe	Negro	+	-	+
Oxido Ti-Sb-V	Gris	-	+	-
TiO₂	Blanco	-	+	-

+ Buen desarrollo del color – Mal desarrollo del color.

2.1.4. Formulación de esmaltes vítreos

Hasta ahora se ha visto de un modo general, cuáles son los componentes de un esmalte vítreo. Pues bien, la combinación apropiada de todos estos componentes para la obtención de la barbotina es lo que se denomina formula de molienda [8]. Para confeccionar una fórmula se debe tener en cuenta varias pautas representadas en la Figura 2.9.

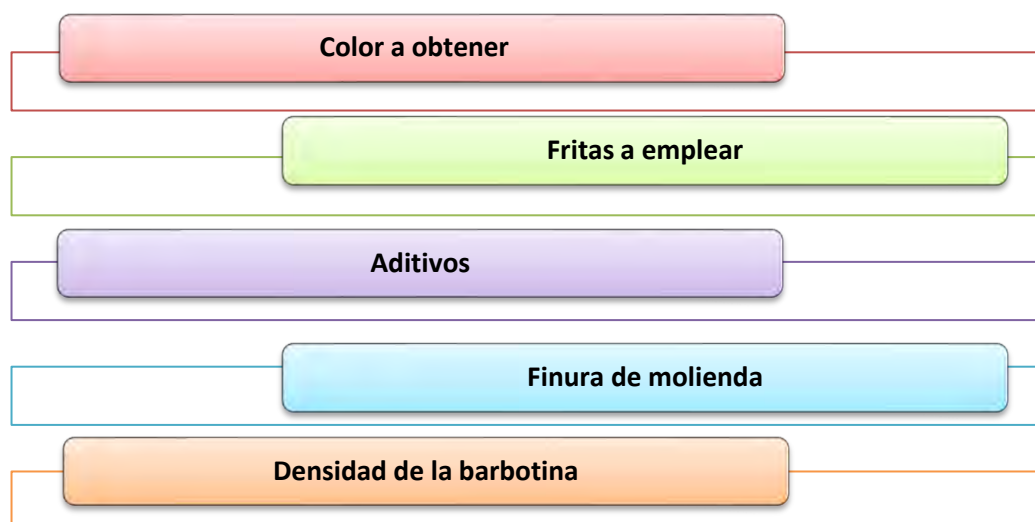


Fig. 2.9. Pautas a tener en cuenta al formular un esmalte.

El color a obtener da una idea de los colorantes y fritas que se deben emplear; no obstante, al confeccionar una formulación industrial se supone que ha sido contrastada previamente en laboratorio con pequeñas moliendas de igualación del color. Un color blanco, tendrá fritas opacas sin necesidad de colorantes ya que estas fritas están opacificadas con TiO_2 . Un color rojo, se obtendrá con una frita transparente y el colorante apropiado.

En los esmaltes de base es muy frecuente introducir diferentes fritas, en función de sus puntos de fusión, con objeto de hacer previamente un cálculo de la fusibilidad del esmalte del esmalte en el horno de vitrificado. En el apartado de aditivos, se siguen las normas de porcentajes en peso con relación a las fritas, citadas anteriormente.

La finura de un esmalte es el tamaño de las partículas de barbotina una vez molida. Para obtener la finura requerida se tendrá en cuenta tanto el tiempo de molienda como el sistema de aplicación de la barbotina. Como norma general, en las barbotinas destinadas al esmaltado por inmersión su finura será de 6-7 y en las de aplicación a pistola neumática la finura será de 0-2.

La densidad, la da la cantidad de agua que se incluya en la formulación, para obtener densidades de 1,70- 1,85 g/cm^3 . A continuación en Tabla 6 se reflejan tres formulaciones; de esmalte de fondo, blanco y de color, con los porcentajes siempre referidos a la cantidad de frita.

Tabla 6. Varias formulaciones de esmalte.

Componentes	Esmalte base %	Esmalte blanco %	Esmalte rojo %
Frita opaca	-	100	-
Frita transparente	-	-	100
Frita base dura	10	-	-
Frita base media	30	-	-
Frita base blanda	60	-	-
Cuarzo	15	3	-
Arcilla basta	6	-	-
Arcilla fina	0,5	5	5
CO_3K_2	-	0,2	-
Aluminato sódico	-	0,15	-
NO_2Na	0,1	-	-
CO_3Mg	0,1	-	-
Fluoborato sódico	-	-	0,5
Colorantes	-	-	4
Agua	45	40	40

2.1.5 Proceso de molienda

La molienda es el proceso en el cual todos los componentes de una formula son introducidos en un molino de bolas y tras un tiempo de molturación se obtiene una suspensión de barbotina para aplicarlo a los objetos a recubrir. Los molinos de bolas son el equipamiento necesario para moler los esmaltes. Estos molinos son cilíndricos, de diferentes dimensiones, revestidos interiormente y con bolas en su interior para poder hacer la molturación de los componentes del esmalte y en especial de las fritas.

Los revestimientos interiores pueden ser de goma, sílex, esteatita y porcelana. Los revestimientos de goma no se utilizan en los esmaltes vítreos ya que las partículas que se desprenden del revestimiento por la fricción con las bolas contaminarían el esmalte molido. El sílex, es un buen material, pero es suministrado en un acabado tosco y necesita juntas de unión muy anchas entre placa y placa y el cemento que se puede desprender puede también contaminar el esmalte molido. Lo más empleado y recomendable es el revestimiento de esteatita o de porcelana.

Las bolas suelen ser de pedernal, porcelana o esteatita, siendo lo más recomendable los dos últimos materiales. Las bolas deben cumplir los siguientes requisitos: Ser duras y resistentes a la abrasión, ser un material denso (porcelana $2,4 \text{ g/cm}^3$, esteatita $2,8 \text{ g/cm}^3$), tener forma esférica, lisas y ser homogéneas. Generalmente se usan bolas de tres tamaños diferentes y la diferencia de ϕ entre las bolas no debe ser muy grande, para evitar que las bolas pequeñas sean rotas por las bolas grandes. Estas bolas grandes sólo se necesitan en la etapa inicial del proceso de molturación ya que cuando la frita ha sufrido una cierta desintegración, la siguiente reducción de tamaño de partículas corresponde a las bolas más pequeñas. Es muy frecuente utilizar bolas de 60, 50, 40 y 30 mm de ϕ ; dependiendo el tiempo de molienda del tamaño de las bolas y del volumen de las mismas añadidas al molino.

Se ha comprobado [9] que la mayor capacidad de molienda se obtiene cuando el 55% del volumen del molino está ocupado por bolas y distribuidas de la siguiente forma: 20-25 % de bolas grandes + 20-25 % de bolas pequeñas + 60-50 % de bolas medianas. También se debe tener en cuenta en los cálculos del nº de bolas, que el volumen real de bolas es del 63 % del volumen teórico de las bolas 55 %.

El volumen que ocupan los materiales cargados al molino oscila entre el 14 5 y el 20 %, dependiendo del material de las bolas. Esto se debe a que las bolas de porcelana tienen una densidad de $2,4 \text{ g/cm}^3$ y las de esteatita $2,8 \text{ g/cm}^3$ y como es evidente a más densidad de bolas menos masa de bolas son necesarios y por tanto más frita se puede cargar en el molino.

Otro parámetro del proceso de molienda es la velocidad del molino. Durante la rotación del molino y debido a la fricción, la carga es arrastrada hacia arriba por el revestimiento interior. Con una alta velocidad periférica, debido a la fuerza centrífuga, la carga se mantendrá siempre en el mismo lugar, no existiendo molturación. Si la velocidad es baja,

la carga no será llevada hacia arriba, debido a que el propio peso es mayor que la fricción, dando lugar a que el revestimiento se deslice debajo de la carga, siendo la acción de molienda muy baja. Estos dos casos no son apropiados para una correcta operación de molienda. La velocidad deberá ser tal que la carga suba hasta la altura correcta, desde donde caerá en cascada sobre la carga que está debajo. Esta velocidad dependerá de las dimensiones internas del molino y del tipo de bolas empleado, oscilando esta velocidad entre 17- 34 rpm.

El tiempo de molienda depende fundamentalmente de la finura deseada en la suspensión de la barbotina a obtener. A mayor finura, mayor tiempo de molienda y con bolas de esteatita menor tiempo de molienda que con bolas de porcelana; debido a la densidad del material.

Normalmente se instalan en el molino aparatos de medida del tiempo o también contadores de vueltas para que cuando el molino llegué al tiempo o vueltas programadas, se pare automáticamente. Una vez parado el molino, se comprueba la finura y si aún no es la correcta, se procede a ajustarla definitivamente mediante algo más de tiempo de molienda.

2.1.6. Descarga y controles a efectuar sobre la barbotina molida

Una vez que se considera que el esmalte está molido, debe ser sometido a una serie de controles antes de su descarga que básicamente son: Finura, densidad, peso de aplicación y placas de control del color. El control del color se realiza visualmente por comparación con las placas patrones. Cuando se necesita que el control de color sea exacto con los patrones fijados, se utiliza para su medida el método colorímetro, el cual está basado en tres colores primarios; rojos, verde y azul.

Durante la descarga, la barbotina se pasa por tamices vibradores con el fin de eliminar partículas de frita sin moler o pequeños trozos de bolas rotas. Se utilizan mallas de tamiz de 40-50 hilos / pulgada. El esmalte ya descargado, se bombea a depósitos de almacenaje, provistos de agitación con batidores, donde el esmalte se enfría ya que sale del molino a unos 40 °C.

En Figura 2.10, se representa esquemáticamente todo el proceso de carga, descarga y almacenaje del esmalte molido.

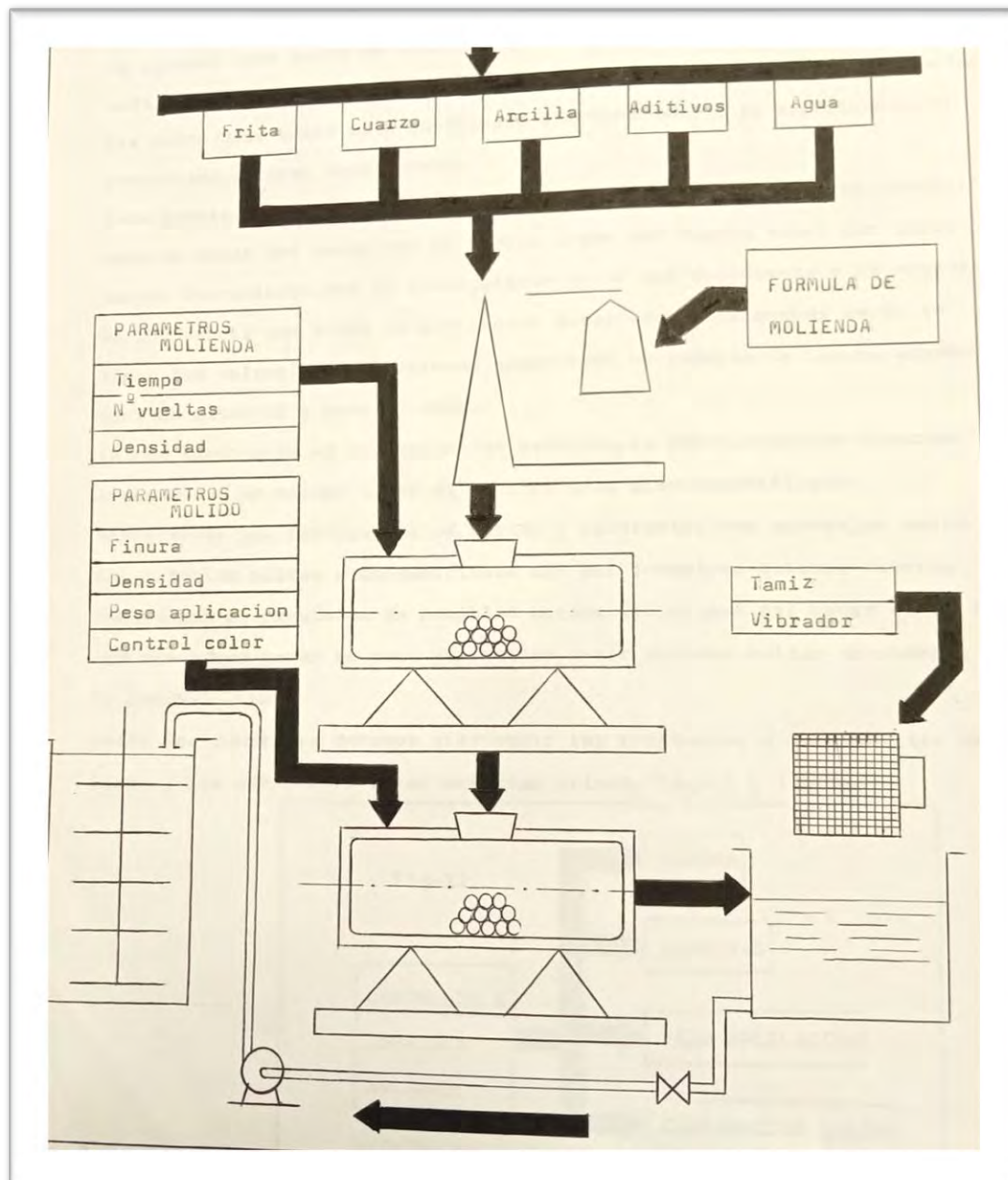


Fig. 2.10. Proceso de carga, molienda y descarga de esmalte molido.

2.1.7. Procesos de esmaltado de acero vitrificado

Para un correcto esmaltado de chapa de acero, se tendrá en cuenta las diferentes fases del proceso, las cuales esquemáticamente se representan en la Figura 2.11.

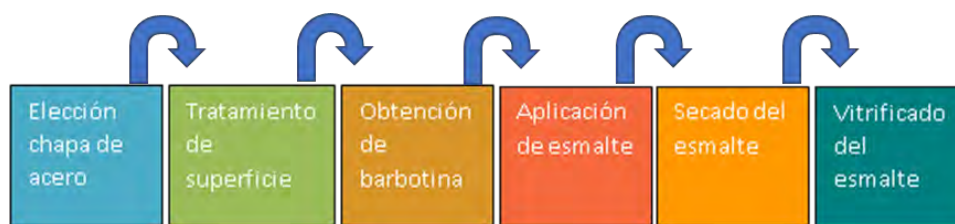


Fig.2.11. Fases del proceso de esmaltado.

Elección de la chapa de acero. Para la obtención de buenos resultados en el esmaltado de acero, es importantísimo que la chapa de acero tenga ciertas calidades superficiales y de composición química. Entre estas características se pueden citar las siguientes: Tener suficientes calidades de embutición + Bajo contenido en % de C + Selección correcta de espesor de chapa con el fin de dar la rigidez necesaria a las piezas ya que serán sometidas a fuertes tensiones durante las cocciones con temperaturas superiores a los 800°C. Normalmente se manejan espesores de 0,8mm- 2mm.

En Tabla 7, se indican las composiciones químicas del acero laminado en frío y del acero descarburado.

Tabla 7. Composiciones químicas de aceros aptos para esmaltar.

Calidad	% C	% Mn	% P	% S	% Al	% Si
Acero laminado en frío	0,08	0,35	0,015	0,03	-	-
Acero descarburado	0,002	0,35	0,008	0,026	-	0,004

Las calidades más apropiadas son el acero laminado en frío y concretamente la calidad DC01EK y en el caso del acero descarburado las calidades DC03ED y DC04ED.

La diferencia principal de esta calidad es el porcentaje de C y la resistencia a la deformación del acero con la temperatura de trabajo, la cual es mayor en las calidades de descarburado.

Tratamiento de superficie del acero. Las piezas de chapa de acero se encuentran engrasadas como consecuencia del proceso de laminado y corte en las acerías y del proceso de embutido en el propio taller de esmaltería. El objetivo del tratamiento de superficie es limpiar la grasa y otros depósitos mediante desengrasantes; bien por inmersión o por aspersión. Actualmente el método más utilizado es el de aspersión ya que produce sobre la chapa de acero un doble tratamiento: químico por el producto desengrasante y mecánico por el choque del reactivo contra la chapa debido a la aspersión.

El proceso de tratamiento de superficie de un modo esquemático se representa en la Figura 2.12

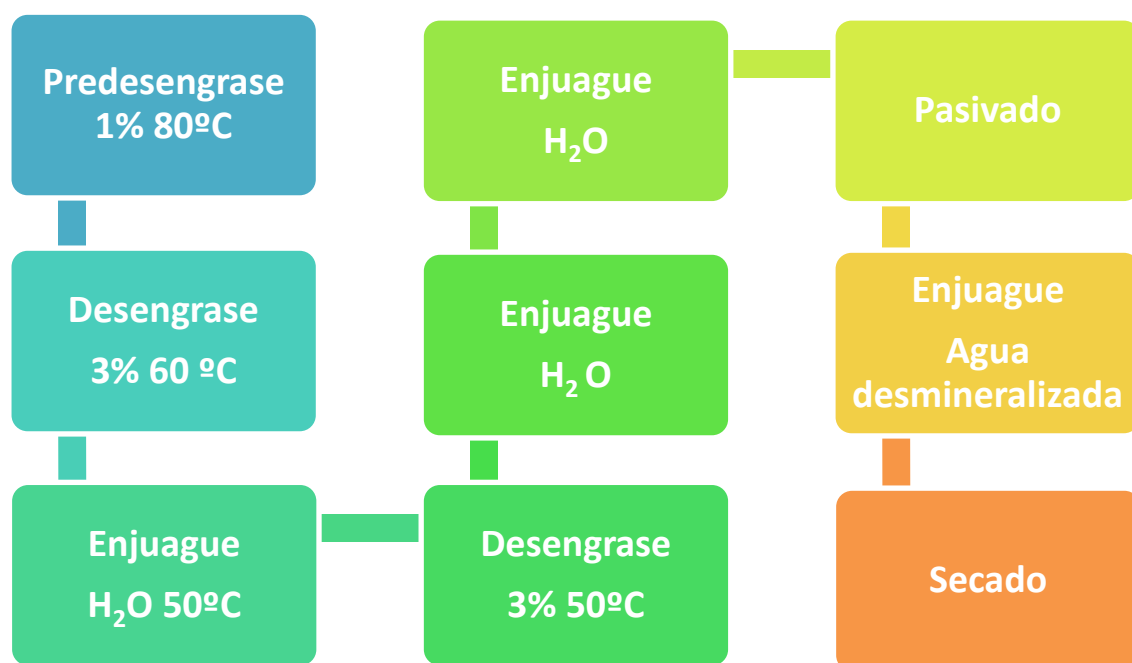


Fig. 2.12. Esquema de las fases del tratamiento de superficie.

Obtención de la barbotina. Se ha comentado en los apartados 2.1.5 y 2.1.6.

Sistemas de aplicación del esmalte. Este apartado trata de las diferentes técnicas empleadas para recubrir con barbotina los objetos a esmaltar, Figura 2.13.

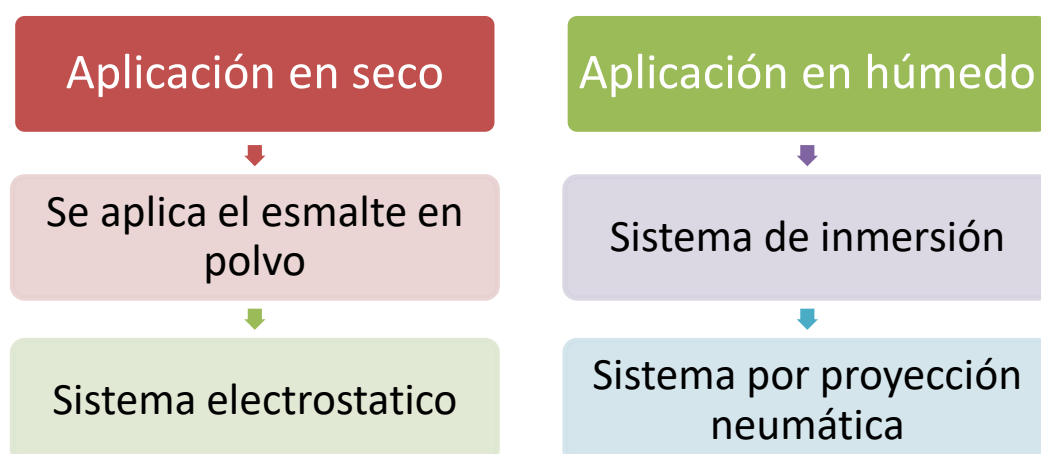


Fig. 2.13. Sistemas de aplicación del esmalte.

El sistema de aplicación en seco es también llamado de aplicación en polvo y para su aplicación se emplea un sistema electrostático que consiste en crear una diferencia de potencial entre la punta de la pistola y la chapa a recubrir. En el momento que cesa esta diferencia de potencial, el esmalte ya no se deposita y cae. Este sistema es muy apropiado para piezas grandes, planas y con una sola capa de esmalte; tiene la ventaja que se pueden ajustar mucho las capas de esmalte y que no necesita secado, por el contrario, los equipos de aplicación son muy caros y existe una gran limitación de colores con este tipo de esmaltes.

El sistema de aplicación más utilizado es la vía húmeda, en sus dos variantes de inmersión y de proyección. El de inmersión consiste en sumergir las piezas que se quieren esmaltar en la masa de esmalte. Una vez introducidas las piezas, se dejan escurrir de forma natural, desprendiéndose el esmalte sobrante, lo cual es de nuevo utilizado. Actualmente para realizar esta operación hay máquinas automáticas con una alta capacidad de producción para fabricación de menaje de cocina, en las cuales un sólo operario deposita y quita pieza, haciendo el bañado de la pieza la máquina de forma automática. Este sistema de inmersión posibilita obtener altas producciones y el aprovechamiento integral de la barbotina, pero sin embargo la distribución del esmalte en las superficies es poco uniforme.

Un factor muy importante de este sistema de aplicación es la reología de la masa de esmalte, la cual debe ser controlada y acondicionada con bastante regularidad ya que con el frío disminuye la consistencia y con excesivo calor aumenta, siendo la temperatura idónea de 19 – 24 °C. Este sistema es el ideal para aquellas piezas que vayan recubiertas por ambas caras de esmalte base, siendo la capa de esmalte depositada con un espesor de 90 – 120 µm. Todas las piezas una vez esmaltadas son depositadas en transportadores continuos para ser sometidas al secado.

El sistema de aplicación por proyección se utiliza sobre todo para los esmaltes de cubierta o para aquellas piezas que presenten dificultades en el sistema de escurrido. Este sistema; tiene sus ventajas e inconvenientes, entre las que podemos citar: Superficie de esmaltado regular + espesores uniformes de 120 – 130 µm + automatización mediante robots y entre los inconvenientes, el más importante es la pérdida de esmalte no recuperable.

El dispositivo que se utiliza para la proyección del esmalte está formado, ante todo, por un compresor que proporciona aire comprimido necesario a una presión de 3 atmosferas. La pulverización, se consigue mediante pistolas especiales, constituidas fundamentalmente por 2 boquillas, situadas una en el interior de la otra. La presión del aire arrastra consigo la masa de esmalte para ser proyectada a las piezas a esmaltar.

Las cabinas de aplicación deben ser de acero inoxidable, evitando otros materiales como el hierro ya que debido a la humedad se produce óxido de hierro, el cual contaminara

los esmaltes. Generalmente las cabinas están dotadas de cuadro eléctrico con temporizadores de pintado, soportes giratorios donde se depositan las piezas para su aplicación y cuadros neumáticos a los que irán conectadas las mangueras de aire mediante un sistema de enchufes rápidos. Asimismo, las cabinas tendrán una zona de aspiración del polvo originado durante la aplicación que se conectará con filtros de mangas para evitar que salgan partículas de esmalte a la atmosfera. Las cabinas también disponen de zonas de evacuación de esmalte sobrante para su posterior recuperación y de instalación de agua para lavado de pistolas en los cambios de color.

Un capítulo importante de este sistema de aplicación son las pérdidas de esmalte que se producen durante el esmaltado y que originan residuos, los cuales son los objetivos de este trabajo de investigación para su aprovechamiento mediante reciclado.



Fig. 2.14. Distribución de pérdidas de esmalte en la aplicación por proyección.

Del total de esmalte que sale a producción; el 40% va a las piezas y el 60% queda sin aplicación. De este 60%, un 52% se recupera y de nuevo se introduce al molino mezclado con esmalte virgen, un 7% se pierde por aspiración y es recogido en filtros de mangas y un 1% se pierde en el lavado de las cabinas y pistolas, el cual es recogido en aguas residuales que posteriormente pasan por filtros prensa y recogidos en forma de tortas de filtrado, Figura 2.14.

Las cabinas de aplicación deben mantenerse siempre limpias y después de la aplicación y sobre todo en los cambios de color se deben lavar para evitar la contaminación de diferentes colores. Las tuberías de aire deben estar dotadas de separadores de agua y aceite, los cuales se purgan regularmente para evitar la contaminación de piezas esmaltadas con el aceite de la red de aire.

Secado del esmalte. Una vez aplicado el esmalte, por cualquiera de los dos métodos indicados, las piezas esmaltadas se van cargando en transportadores para su paso por el secado. El secadero es una instalación cerrada, con una entrada y salida y por su

interior circulan las piezas húmedas para su secado. En el interior del secadero, el transportador está diseñado con un sistema de vueltas de la cadena con objeto de someter a las piezas al mayor tiempo de contacto con el aire caliente; siendo la temperatura del interior del secadero de 110°C y el sistema de secado de las piezas es por convección. Normalmente el aire caliente procede de los gases de combustión del horno de vitrificado y el objetivo del secado es la eliminación del agua con la que se preparó la suspensión de esmalte. La pieza esmaltada, después del secado, tiene la apariencia de un polvo muy fino adherido a la superficie de dicha pieza, en ese momento el esmalte seco se denomina bizcocho y el secado permite la manipulación de las piezas.

Vitrificado del esmalte. Una vez seca la capa de esmalte, el objeto esmaltado está listo para su traslado a la cadena del horno de vitrificado.

Los hornos interiormente están recubiertos de ladrillos refractarios de distintas calidades en función de las temperaturas que soporten y ultimamente de paneles de lana de vidrio. Esta nueva tecnología de recubrimiento interior de los hornos, ha supuesto un gran avance ya que un horno industrial de refractario para alcanzar temperaturas de trabajo superiores a 800°C tardaba 3 días y con la lana de vidrio en 4-5 h alcanza la temperatura de trabajo. La alimentación de energía puede ser de Fuel, GLP o CNL, principalmente.

Dentro del horno podemos diferenciar tres zonas: zona de calentamiento, zona de vitrificado o mufla y zona de enfriamiento; siendo la más importante la zona de mufla, la cual está al rojo cereza, tanto de las piezas como de los utillajes, durante el proceso de vitrificado como se puede apreciar en la Figura 2.15.



Fig. 2.15. Estado incandescente de las piezas en mufla de vitrificado (Vitrinor).

Las formas o siluetas más comunes de este tipo de hornos son en forma de U. Los esmaltes de base se vitrifican a 840 – 850°C y en este proceso de vitrificado se consigue la adherencia entre la chapa y el esmalte de base. Los esmaltes de cubierta se vitrifican a 810 – 830°C y el vitrificado confiere las cualidades estéticas (brillo, color, textura) y las cualidades de resistencia química y mecánica.

A continuación, se indican algunos parámetros técnicos de un horno industrial de vitrificado: 4500 kg/brutos/h, correspondiente a las piezas y utillajes; longitud de cadena 141 m; velocidad de cadena 2,2 m/minuto; longitud de mufla 12 m; 5,45 minutos de estancia en zona de vitrificado; temperatura de cocción 835°C máximo y

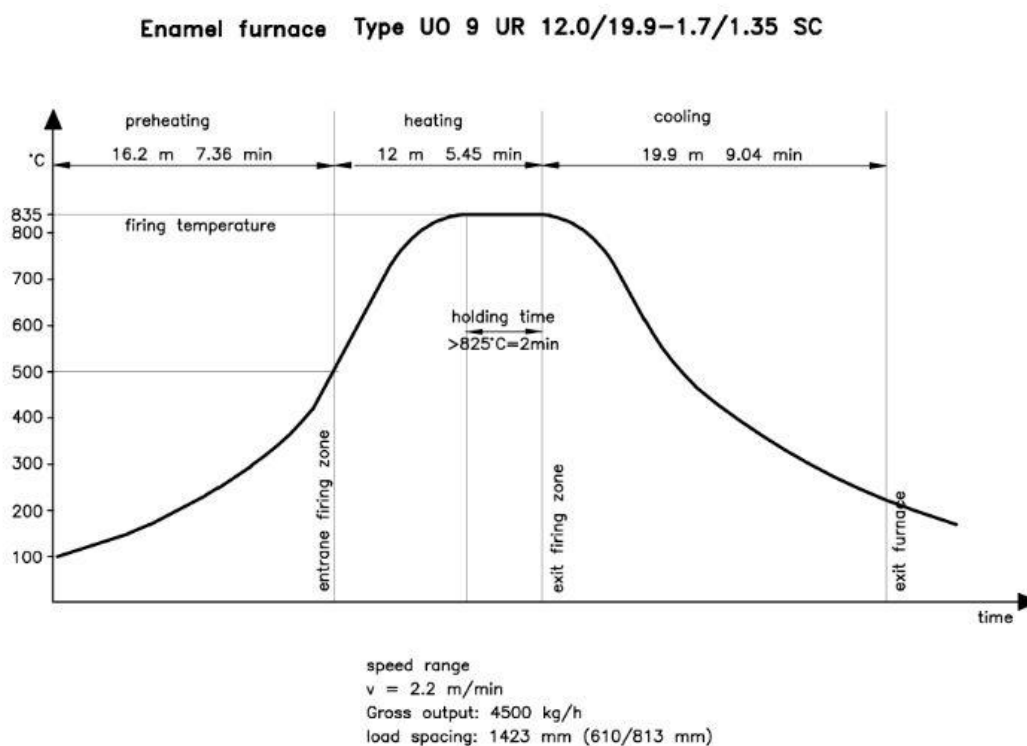


Fig.2.16. Curva de vitrificado (Vitrinor).

con una permanencia de 2 minutos por encima de 825°C. Estas características de cocción nos dan una cuestión clave a tener en cuenta durante el vitrificado y es la curva de cocción, representada en la Figura 2.16.

Como resumen de este punto 2.1.7, se representa esquemáticamente el proceso en Figura 2.17.

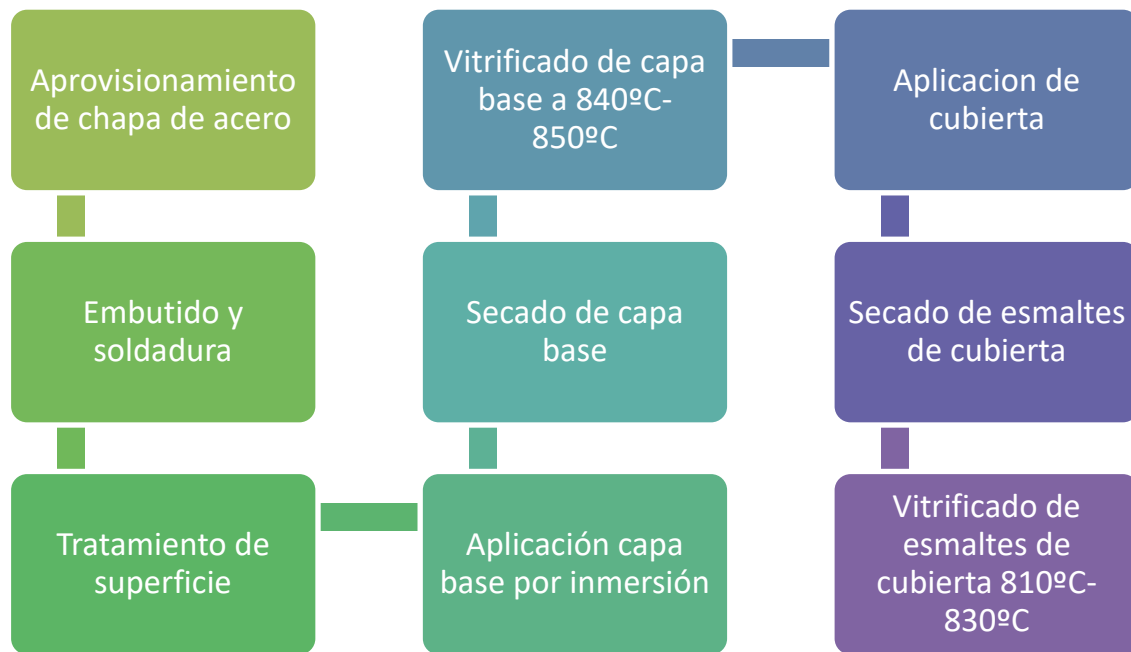


Fig. 2.17. Esquema de proceso de vitrificado de chapa de acero.

2.1.8. Cualidades del esmalte vítreo. El acero vitrificado combina las propiedades de resistencia mecánica propia del acero con la estabilidad y resistencia del esmalte vítreo frente a adversas condiciones ambientales. Entre estas cualidades se pueden indicar las siguientes:

- . **Estabilidad de color.** El esmalte vítreo proporciona un acabado permanente en un amplio espectro de colores ya que los pigmentos inorgánicos empleados son fundidos con la matriz vítrea y por tanto resistente al envejecimiento.
- . **Resistente a la temperatura.** El material no sufre alteración por cambios de temperatura, permaneciendo inalterable entre -50°C y 450°C . Es totalmente ignífugo y en contacto directo con la llama no produce vapores tóxicos.
- . **Choques térmicos.** Debido a su resistencia a la temperatura, soporta bien los choques térmicos.
- . **Resistencia a la corrosión.** El nivel de protección de la chapa de acero es muy alto debido a los espesores de esmalte aplicado de $250\text{-}300\ \mu$. Resiste en los ensayos de corrosión en cámara de niebla salina más de 400 horas sin defectos superficiales.
- . **Alta dureza.** Debido a su naturaleza vítrea, el acero vitrificado posee una dureza entre 5-7 en la Escala de Mohs.
- . **Resistencia al impacto.** A lo largo del tiempo han existido diversos ensayos para poder expresar este parámetro numéricamente. El método más fiable es el de Wegner que consiste en aplicar diferentes fuerzas sobre la superficie vítrea y debe resistir esta superficie al menos 20 N.

. **Resistencia al rayado y al desgaste.** Son dos propiedades distintas pero muy relacionadas con la dureza y en las superficies vítreas estos parámetros son altos.

. **Alta resistencia química.** Estas superficies son muy resistentes a los ácidos y los álcalis. El único ácido que ataca estas superficies mateándolas es el HF, el cual también ataca al cristal. Su resistencia química se ensaya, bien en frío con ácido cítrico (H-COOH) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) y en el caso de los álcalis con sosa (OHNa). También se realizan ensayos en caliente, a ebullición, tanto de ácidos como de álcalis. La resistencia en frío se cuantifica en AA, A, AB, B, C y en caliente por la pérdida de peso de la muestra de ensayo.

. **Fácil de limpiar.** Simplemente con agua y jabón debido a su naturaleza vítrea. Los grafitis de pintura se limpian con disolventes, los cuales no decoloran la superficie vítrea.

. **Altamente higiénicos.** Al tener una textura no porosa, semejante al vidrio, no permite el desarrollo de colonias de bacterias ni mohos. No absorbe olores, ni desprende sustancias tóxicas para las personas. Esta cualidad es muy importante ya que actualmente se están recubriendo quirófanos con paneles de acero vitrificado debido a su facilidad de limpieza y altas cualidades higiénicas. El Instituto Pasteur de París, hizo hace años, un estudio comparativo de las características higiénicas de varios materiales; madera, acero inoxidable, vidrio, antiadherente, aluminio, acero vitrificado, concluyendo sus investigaciones en que el más higiénico era el cristal, seguido de cerca del acero vitrificado y el acero inoxidable. Sirva otro ejemplo; hasta hace no mucho e incluso actualmente se emplean vasijas de acero vitrificado para contener utensilios en los quirófanos de los hospitales.

Todas estas cualidades tienen sus propios ensayos normalizados para su verificación y en la Tabla 8 se indican algunos de ellos.

Tabla 8. Normativas de ensayos de calidad del acero vitrificado.

CUALIDAD	NORMA DE ENSAYO	VALOR
Dureza.	UNE 67-101	5-7 Escala de Mohs
Resistencia al ácido cítrico a temperatura ambiente.	UNE-EN-14483-1-05	Mínimo clase A
Resistencia al ácido cítrico a ebullición	UNE-EN-14483-2-05	Pérdida de peso 0 g/cm^2
Resistencia al ácido sulfúrico a temperatura ambiente.	UNE-EN-14483-1-05	Mínimo clase A
Resistencia al impacto.	DIN 51155 /ISO 4532	Mínimo 20 N
Choque térmico.	BS 1344-1	Sin defectos superficiales
Corrosión niebla salina.	UNE-EN-ISO 9277: 2007	0 defectos a las 408 horas
Resistencia a la abrasión.	BS 1344-4 ASTM C 501	< 0,05 g

2.2. Generación de los residuos de esmalte vítreo objeto de esta investigación

En este punto se va a analizar el origen de estos residuos; donde se generan los residuos y los centros productivos de generación de dichos residuos.

En primer lugar, se debe puntualizar que el residuo de esmalte vítreo es originado; tanto en VITRISPAN como en VITRINOR, ya que ambas empresas pertenecientes al GRUPO VITRINOR, se dedican a la fabricación de recubrimientos de acero con esmalte vítreo, aunque los productos fabricados en ambas son totalmente diferentes; VITRINOR fabrica menaje de cocina y VITRISPAN paneles de arquitectura, pero ambas tienen un denominador común que es el esmalte vítreo empleado para recubrir el acero.

Debido a este denominador común; la barbotina o esmalte molido, se procesa en la sección de molinos, la cual aprovisiona de barbotina a las esmalterías de ambas empresas, en función de sus respectivos programas de fabricación. En esta sección de molinos, es dónde se originan los primeros residuos, principalmente en forma de aguas residuales de lavado, procedentes tanto del lavado de molinos en los cambios de color como de lavado de útiles de trabajo, bombas de aplicación de color, cubas de esmaltado por inmersión, bidones de aprovisionamiento de esmaltes, etc.

Toda la sección de molinos, esta recorrida longitudinalmente por una arqueta, la cual, debido a una pequeña inclinación del suelo, recoge todas las aguas de lavado, las cuales son enviadas a un pozo provisto de bomba, desde el cual son enviadas a las piscinas de decantación, ubicadas en el exterior de fábrica Figura 2.18.



Fig. 2.18. Sala de molinos y arqueta de recogida de aguas de lavado (Vitrinor).

De la sección de molinos, se va abasteciendo de esmalte molido, tanto a la esmaltería de VITRISPAN como de VITRINOR y en estos centros de producción, se generan nuevos residuos de esmalte vítreo, como se ve a continuación. En ambas esmalterías se generan

2 tipos de residuos: Residuos en polvo y aguas residuales con un alto contenido de partículas de esmalte vítreo en suspensión, semejante a las aguas de molinos.

Los residuos en polvo; de ambas esmalterías proceden de las pérdidas por aspiración durante la aplicación por proyección neumática del esmalte. Todas las cabinas de aplicación tienen aspiradores que están conectados con diferentes filtros de mangas que retienen las partículas de esmalte, evitando la salida al exterior de aerosoles cargados con partículas de esmalte. Figura 2.19



Fig. 2.19. Filtro de mangas (Vitrinor).

Se debe decir que produce más residuo en forma de polvo VITRINOR que VITRISPAN y esto es debido a un proceso que sufren todas las piezas de menaje y que consiste en lo siguiente:

Durante la aplicación de la capa de color a estas piezas; el fondo exterior de las mismas se contamina de esmalte, el cual una vez seco se somete a una limpieza llamado perfilado, con objeto de poder imprimir una serigrafía en el fondo de las piezas. Las perfiladoras limpian el fondo mediante discos de scotch- brite giratorios y el esmalte eliminado es recogido mediante aspiración que está conectada con filtros de mangas que retienen el residuo en forma de polvo. Los residuos en forma de polvo de ambas esmalterías se almacenan en big- bag con diversos colores mezclados, en función del programa de fabricación y posteriormente son entregados a un gestor autorizado para su eliminación Figura 2.20.



Fig. 2.20. Big- bag con residuos de polvo (Vitrinor).

También en ambas esmalterías se producen; como se indicó anteriormente, aguas residuales procedentes del lavado de cabinas en los cambios de colores, lavado de pistolas de aplicación, bombas, cubas de aplicación por inmersión, etc. Estas aguas están muy cargadas de sólidos en suspensión y son recogidas en ambas esmalterías en arquetas ubicadas convenientemente y bombeadas a las piscinas de decantación en el exterior de fábrica, donde se juntan con las aguas de lavado procedentes de molinos. Figura 2.21.



Fig. 2.21. Piscinas de decantación (Vitrinor).

En las piscinas de decantación, las aguas son bombeadas a una instalación de filtros prensa y mediante este proceso de filtrado se originan tortas de filtrado con todos los sólidos de residuo de esmalte y aguas limpias que son evacuadas al exterior. Estas tortas posteriormente son entregadas a gestor autorizado. Figura 2.22.



Fig. 2.22. Filtro prensa y residuo en forma de tortas de filtrado (Vitrinor).

La última parte del residuo se genera en las piscinas de decantación en forma de lodos o fangos decantados, con un alto contenido de sólidos en suspensión debido a las partículas de esmalte, siendo menor la cantidad de este residuo cuanto mayor sea el filtrado en los filtros prensa.

Como final, se dirá que tenemos tres tipos de residuos que, aunque cualitativa y cuantitativamente tengan la misma composición; es decir son homogéneos, su estado físico es distinto: Residuo polvo, residuo tortas de esmalte sólido y residuo de fangos en estado semilíquido o pastoso.

En Figura 2.23, se representa todo el proceso de generación de este tipo de residuos.

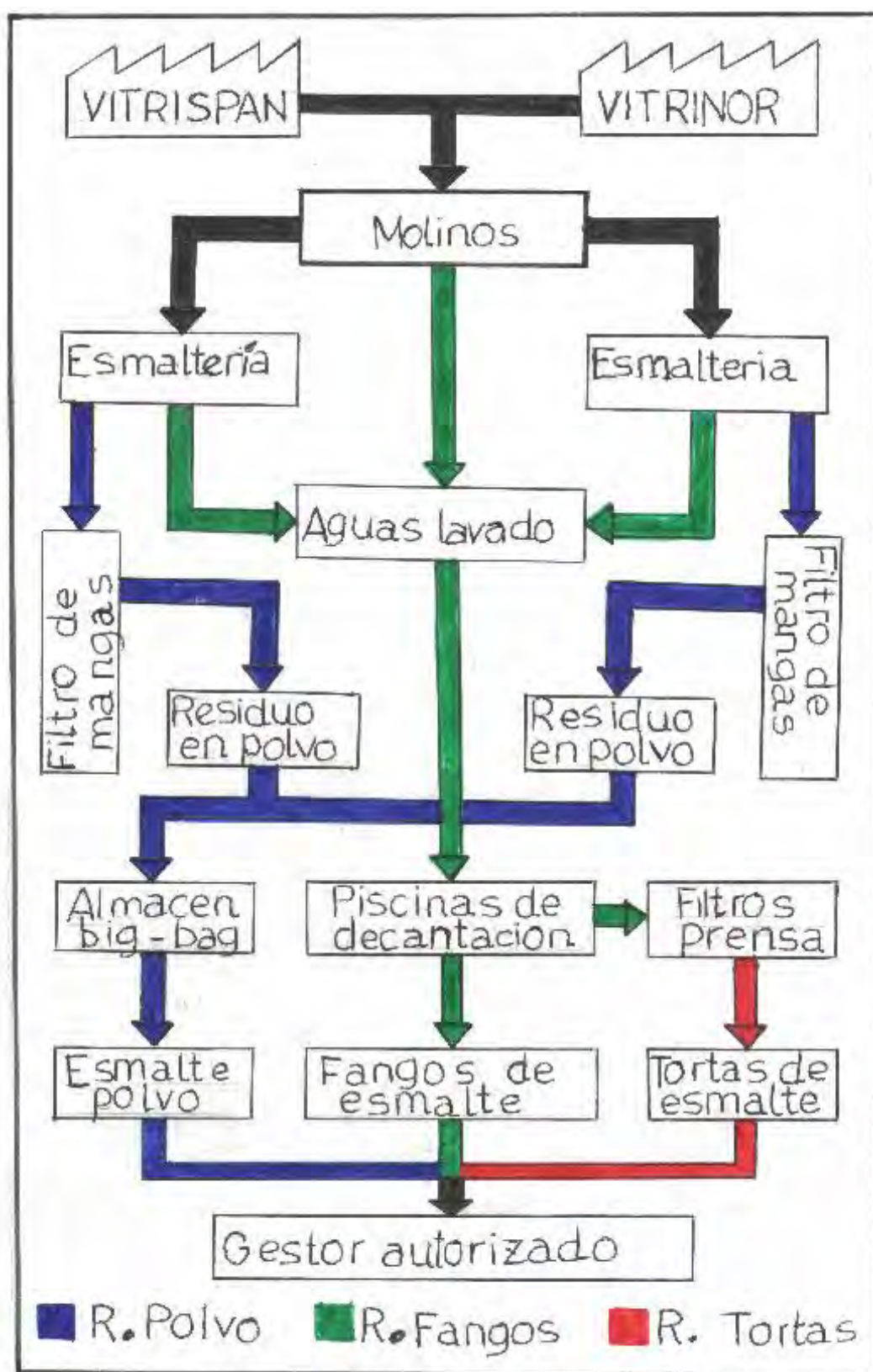


Fig. 2.23. Esquema de generación de estos residuos.

El montante de residuos generados anualmente por ambas empresas y que son entregados a gestor autorizado para su eliminación es de 500 t/año, divididas en los siguientes conceptos:

- . 200 t/año de residuos polvo.
- . 200 t/año de residuos tortas.
- . 100 t/año de residuos en forma de fangos.

En Figura 2.24 se representan estos datos y sus porcentajes.

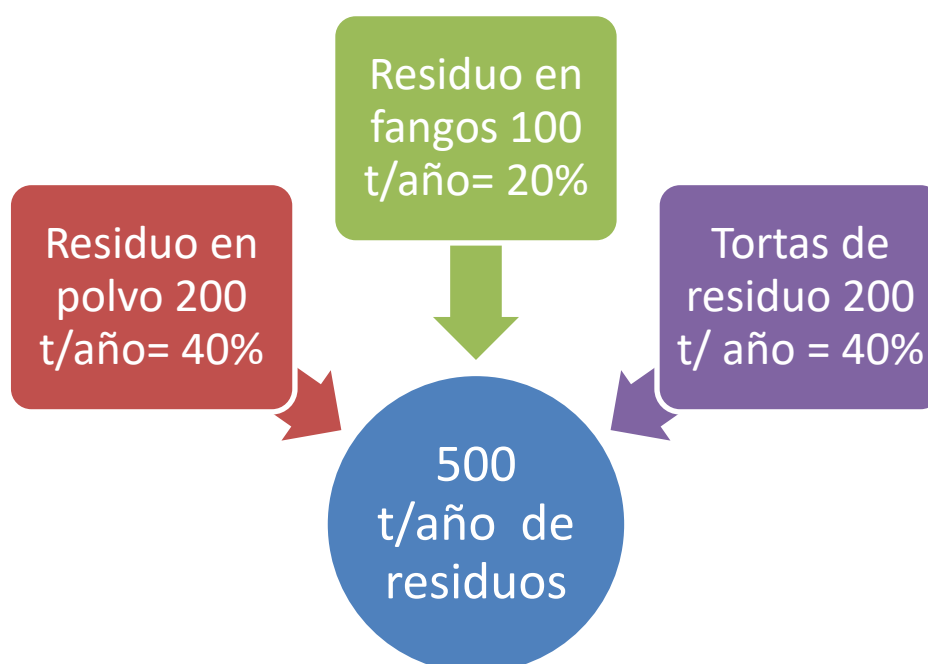


Fig. 2.24. Cuantificación de los residuos generados.

Todos los residuos generados, debido a la actividad industrial, tanto de VITRINOR S.A.L como de VITRISPAN S.A; suponen para ambas empresas una penalización tanto en el ámbito ambiental como en el económico ya que estos residuos están debidamente gestionados y esta gestión tiene un importante valor económico.

Este trabajo de investigación trata de ver la forma de reutilizar estos residuos cerámicos en algo útil y de esta forma valorizar dichos residuos.

2.3.- Cementos y adiciones

2.3.1. Breve historia del cemento

A lo largo de la historia, el cemento ha sido el principal material de construcción empleado por la humanidad.

En el año 2600 aC, el pueblo egipcio ya utilizaba un mortero (arena y materia cementosa) para unir bloques de piedra; así una de las pirámides de Gizet [11] fue levantada con hormigón. También en el mural de Tebas [11] se conservan escenas de hombres fabricando hormigón.

En la Antigua Grecia (450 aC), utilizando tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini, obtuvieron los primeros cementos naturales [11]. El Imperio Romano, utilizaba un cemento natural, que ha resistido la inmersión en agua marina durante milenios; formado por cenizas volcánicas obtenidas en Pozzuoli [12], cerca del Vesubio. Así el Coliseo de Roma contiene hormigón en sus cimientos (82 dC) y la construcción del Panteón de Roma (127 dC) se utilizó hormigón para construir la cúpula de 50 m de diámetro Figura 2.26.



Fig. 2.26 Panteón de Roma. Cúpula interior (Panteón Roma. Interior/artehistoria.com).

Durante la Edad Media, también se utilizó como una herencia romana; así en el 1200 se construyó la Catedral de Salisbury, cuyos cimientos están hechos en hormigón [11].

En el siglo XVIII; concretamente en 1759, John Smeaton, ingeniero inglés, desarrolló un nuevo mortero para unir bloques de piedra en la construcción del faro de Eddystone. En el siglo XIX, en 1824 James Parker y Joseph Aspdin, patentaron un nuevo cemento hidráulico artificial, fabricado por la combustión de la caliza y carbón que llamaron Portland Cement por su color oscuro, similar a la piedra de la isla de Portland y por cierto en estos inicios, este cemento no era demasiado empleado a causa de su compleja fabricación que encarecía el producto [12].

En 1845, Isaac Jhonson [11] creó un prototipo de cemento moderno, mezclando caliza y arcilla calcinados a alta temperatura.

En el siglo XX [12], surge el auge de la industria del cemento como consecuencia de varias cuestiones; las experiencias de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, los cuales logran cemento de calidad homogénea obtenido de forma artificial; a la invención del horno rotatorio para la calcinación y a los métodos de transporte del hormigón fresco, ideado por Juergen Heinrich Magens, el cual lo patentó entre 1903 y 1907.

2.3.2.- Importancia del cemento en nuestra sociedad

De todos es conocido, el poder contaminante de la industria cementera, en cuanto al alto consumo energético y térmico, a los también altos impactos ambientales ya sean de modificación del paisaje de sus actividades extractivas con el consiguiente consumo de recursos no renovables o de emisión de gases de efecto invernadero, procedentes de la descarbonatación o del horno de clinkerización; principalmente CO_2 en cantidades de 850 Kg de CO_2 /t de cemento producida.

A pesar de todas estas problemáticas; los cuales son evidentes e incontestables, el cemento es un producto esencial en la vida de las sociedades modernas y sin el cual no podríamos desarrollar muchas de nuestras actividades cotidianas, siendo la base de un sinnúmero de construcciones: viviendas, puentes, naves industriales, escuelas, hospitales, túneles, carreteras, calles, resultando interminable la lista de infraestructuras construidas en base al cemento Figura 2.27.



Fig. 2.27 Viaducto de Millau
(www.mexicorutamagica.com.mx).

Las capacidades de las edificaciones en base al hormigón (principal aplicación del cemento) incluyen adaptabilidad a las necesidades constructivas, resistencia mecánica, al fuego, aislamiento acústico y otras muchas características; incluso ayudando a la sostenibilidad mediante la recuperación energética y mediante la valorización de residuos en la producción de cemento.

El hormigón ha sido un elemento clave en el desarrollo de las infraestructuras, facilitando las comunicaciones con la construcción de carreteras, túneles y puentes, lo cual ha ido en una mejora sensible de la calidad de vida de las sociedades y de la comunicación de distintas sociedades.

También; el hormigón ha contribuido a la mejora de la salud ya que durante el siglo XIX [11] se comenzó a introducir el hormigón como material de construcción de forma masiva en conducciones de suministro de agua y en los sistemas de alcantarillado; recordemos que anteriormente la eliminación de aguas residuales se realizaba empleando las calles y canales abiertos hacia ríos y arroyos cercanos, provocando olores y enfermedades frecuentes.

El hormigón ha contribuido a la seguridad; ya que, en caso de incendio, no desprende gases tóxicos y no es combustible, ofreciendo protección y seguridad contra el fuego de las personas y de los bienes. En 1941; tuvo lugar el gran incendio de Santander, debido al viento Sur y a las construcciones de madera existentes, gran parte de la ciudad fue devorada por las llamas y el desastre no fue mayor debido a algunas construcciones de piedra y hormigón que actuaron como cortafuegos; concretamente los edificios del Banco de España y Correos.

En Tabla 9, se muestra una comparativa del comportamiento de distintos materiales frente al fuego.

Tabla 9. Comportamiento frente al fuego de madera, acero y hormigón.

Parámetro	Madera	Acero	Hormigón
Resistencia al fuego sin protección	Muy baja	Baja	Alta
Combustibilidad	Alta	Ninguna	Ninguna
Contribución a la carga de fuego	Alta	Ninguna	Ninguna
Conductividad de calor	Baja	Muy alta	Ninguna
Incorpora protección frente al fuego	Muy baja	Baja	Alta
Reparación después del fuego	Ninguna	Baja	Alta

En cuanto a la sostenibilidad, se puede decir que el sector cementero ha sido una de las industrias pioneras en la aplicación de la “Economía Circular”, estrategia de eficiencia de “hacer más con menos”. Así, las cementeras aprovechan residuos como materias primas para su producto y como aprovechamiento energético.

El aprovechamiento térmico es muy importante como fuente competitiva para las cementeras ya que la energía térmica que demandan es muy alta para obtener temperaturas de proceso de 1500 °C. Este aprovechamiento térmico, reduce las emisiones de CO₂ y reduce el consumo de combustibles fósiles no renovables, así como produce una menor carga de materiales en vertederos [13].

En Tabla 10, se indican las características térmicas de combustibles alternativos utilizados en fábricas de cemento. [13]

Tabla 10. Combustibles alternativos utilizados en fábricas de cemento (ciment-catala.org/sostenibilidad/recuperación-energética/).

	Lodos de depuradora	Biomasa vegetal	Maderas	CDR	Harinas cárnicas	Neumáticos fuera de uso
Poder calorífico	3.000 kcal/kg	3.500 kcal/kg	3.600 kcal/kg	4.500 kcal/kg	4.600 kcal/kg	8.000 kcal/kg
Origen y procesado	Plantas de secado	Trituración de recogida selectiva	Trituración de recogida selectiva	Plantas de gestión y tratamiento	Despojos de mataderos	Gestores y plantas de tratamiento
						

En las fabricas de cemento; el aprovechamiento energético de los residuos tiene una gran ventaja con respecto a las incineradoras y es que la temperatura de combustión es tan alta y durante tanto tiempo que no se producen dioxinas a esas temperaturas y sin embargo en las incineradoras si se producen y son emitidas a la atmosfera ya que la temperatura de tratamiento es mucho menor.

Siguiendo con los principios de la “Economia Circular”; las cementeras al igual que otras muchas industrias, buscan mejorar su eficiencia en el proceso productivo para reducir el consumo de recursos naturales. Las fabricas de cemento [13] reciclan gran cantidad de subproductos industriales para sustituir parcialmente las materias primas en la fabricación del clinker o como adiciones al clinker para obtener los diferentes tipos de cementos Figura 2.28.

El proceso de fabricación del cemento posibilita el reciclaje por dos vias:

. Como sustituto de materias primas, cuando se mezclan los subproductos industriales con las materias naturales (calizas y margas) antes de entrar en el horno, permitiendo reducir los recursos naturales que se extraen de las canteras. Estos subproductos más utilizados son cenizas de piritas (alto contenido en hierro), lodos de papeleras (CO_3Ca), arenas de fundición (SiO_2) y residuos de demolición (de naturaleza cálcica o silícica) [13].



Subproductos industriales utilizados en cementeras (ciment-catala.org/sostenibilidad/valorización-material-residuos/).

Como adiciones al cemento, cuando los subproductos industriales se dosifican y muelen con el clinker, para modificar algunas de sus propiedades estándar como la velocidad de endurecimiento, durabilidad frente al agua salina. Se utilizan residuos con propiedades hidráulicas o puzolánicas como: cenizas volantes de centrales térmicas, escorias de alto horno, puzolanas industriales, yesos industriales [13].

En España existen 35 fábricas de cemento y en estos momentos es mayor la producción que la demanda interior, lo cual da pie para realizar exportaciones.

En Figura 2.29, se indican la ubicación de las cementeras en España y la evolución de la producción y el consumo desde el 2006 al 2012.

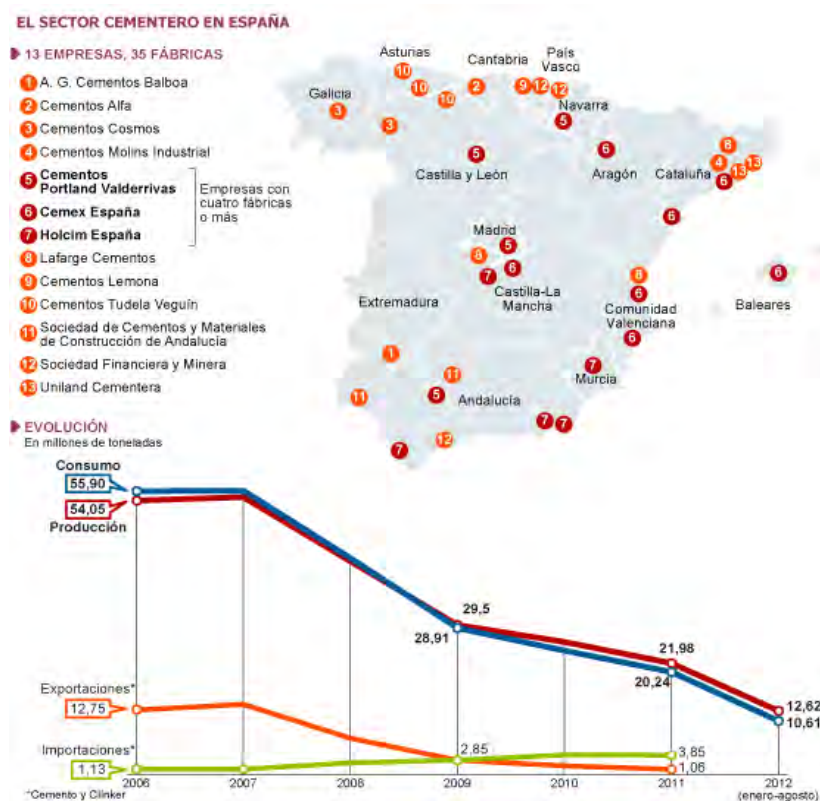


Fig.2.28.

Fig.2.29. Ubicaciones cementeras en España y evolución de producción y consumo (www.elpais.com)

Como final de este punto, se puede decir que además del beneficio que produce para la sociedad española en general; también produce un importante beneficio local y de los alrededores de las ubicaciones de las fábricas como se representa en la Figura 2.30

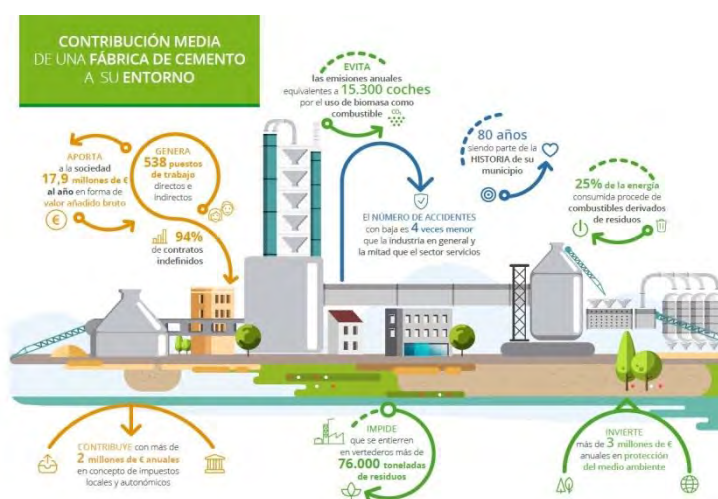


Fig. 2.30. Contribución al entorno de una fábrica de cemento (oficemen.com/sostenibilidad/responsabilidad-social-empresarial/).

2.3.3. Definición de cemento Portland

Etimológicamente, la palabra “Cemento” procede del latín “Caementun” que significa entre otras cuestiones “Argamasa”. A esto debemos unir el término Portland, que como ya se indicaba en el punto 2.3.1 de este trabajo; se debe dicho nombre a la semejanza en aspecto con las rocas que se encuentran en la isla de Portland, sur de Inglaterra, que suelen tener un color gris pizarra intenso.

Según la norma UNE 197:1-2011; el cemento Portland se define como “Un material inorgánico finamente dividido, que amasado convenientemente con agua forma una pasta que fragua y endurece en función de una serie de reacciones y procesos de hidratación y que una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso debajo del agua.” En definitiva; es un material que tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes.

La gran importancia del cemento Portland reside en ser el compuesto principal de los morteros y sobre todo del hormigón, siendo este el material más empleado en el mundo de las construcciones de todo tipo, tanto públicas como privadas.

En Europa; existe la Asociación Europea del Cemento (CEMBUREAU) cuya sede está en Bruselas y es la voz oficial de todas las asociaciones nacionales de la industria del cemento y de las empresas cementeras, ante la Unión Europea UE.

Según CEMBUREAU, en su Report Activity 2019; la producción mundial de cemento en 2018 fue de 3,99 billones de toneladas y en 2014 fue de 4,3 billones de toneladas.

En Figura 2.31 se representa la producción a nivel mundial en 2018 y la cuota de producción por países y continentes.

World cement production 2018, by region and main countries, % Estimations

3.99 billion tonnes

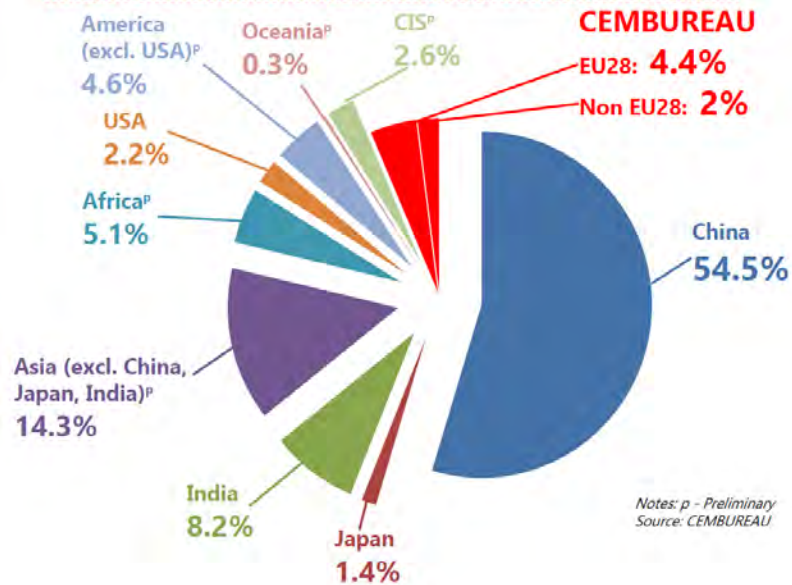


Fig.2.31. Producción de cemento a nivel mundial en 2018 (CEMBUREAU. Report Activity 2019).

2.3.4. Proceso de fabricación del cemento Portland

En primer lugar, se debe decir que para obtener cemento Portland, primero se debe obtener el clinker del cemento; el cual con adiciones de productos y procesos de molienda y homogeneizado se convierte en cemento.



Fig.2.32. Proceso de fabricación del cemento (ciment-catala.org/cemento/proceso de producción).

La fabricación del cemento Portland, es considerado un proceso complejo y consta de tres etapas principales: preparación de materias primas, producción del clinker y mezcla del clinker con adiciones y molienda. En Figura 2.32, se representa de forma esquemática, el flujo de los materiales y las distintas operaciones a realizar para la producción del clinker y el cemento Portland.

A continuación, se explica de forma pormenorizada todo el proceso de fabricación, desde la extracción de la materia prima a la expedición en sacos o a granel del cemento fabricado.

Materias primas. El CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 son los óxidos fundamentales en la composición del crudo de cemento Portland; conteniendo en menores cantidades Na_2O , K_2O , MgO , P_2O_5 y TiO_2 . El porcentaje adecuado de estos óxidos fundamentales en el crudo se obtiene a partir de la mezcla de materiales calizos, arcillosos y minerales de aluminio y/o hierro [16].

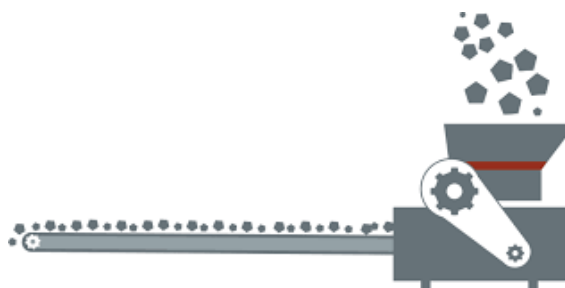
Las rocas calizas son los materiales calizos utilizados en la fabricación del clinker, como aporte de CO_3Ca al crudo, del que posteriormente mediante calcinación obtendremos el CaO necesario. El material arcilloso utilizado normalmente son arcillas que aportan SiO_2 .

Extracción de materiales. Este es el primer paso en la producción de cemento y comienza en las canteras, cuya explotación es a cielo abierto.

Los materiales son extraídos mediante voladuras controladas, en el caso de los materiales duros (calizas y pizarras) y en el caso de los materiales blandos (arcillas y margas) se utilizan excavadoras.



Trituración. Una vez extraído y clasificado el material, se procede a su trituración, hasta obtener una granulometría adecuada y se traslada a la cementera mediante cintas transportadoras o camiones para su almacenamiento en el parque denominado de pre-homogenización.



La trituración se realiza mecánicamente mediante fricción y compresión en molinos de martillo.

Pre-homogenización. El material triturado se almacena por separado para posteriormente seleccionar el material de una forma controlada.

La pre-homogenización permite preparar la dosificación de los distintos materiales de una forma adecuada para reducir su variabilidad.

Molienda de crudo. En primer lugar se dice lo que se entiende por crudo o harina de clinker. Crudo es la mezcla de los materiales convenientemente dosificados que por posterior molienda y cocción origina el clinker. Este crudo se muele para reducir su tamaño y favorecer así su cocción en el horno.

Durante el siglo XIX y hasta el último tercio del XX; los molinos eran de bolas de sílex, siendo actualmente molinos de rodillos verticales, los cuales muelen el material mediante la presión que ejercen 3 rodillos cónicos, al rodar sobre una mesa giratoria de molienda.

El proceso de molienda es uno de los más importantes ya que de ella depende la cocción de los materiales; es decir que una molienda adecuada y homogenización de la materia prima del crudo es necesaria para que el proceso de clinkerización del crudo presente una buena reactividad y aptitud a la cocción.

Producción del clinker. El clinker del cemento Portland, básicamente tiene una composición de 67% de óxido de calcio CaO , un 22% de óxido de silicio SiO_2 , un 5% de óxido de aluminio Al_2O_3 y un 3% de óxido férrico Fe_2O_3 [16].

Estos óxidos, mayoritarios del clinker se encuentran bajo la forma de cuatro fases mineralógicas principales: Alita (C_3S : 50-70%) compuesta por silicato tricálcico; Belita (C_2S : 15-30%) compuesta de silicato dicalcico; fase aluminato (C_3A : 5-10%) compuesta por aluminato tricálcico y una solución sólida de ferrito- aluminatos cálcicos (C_4AF :3-10%). [16]

El proceso de clinkerización se divide en varias etapas dependiendo de la temperatura Figura 2.28 y en dos fases de proceso.

Precalentador de ciclones. La alimentación al horno de calcinación se realiza mediante el pre- calentador de ciclones. El material entra por la parte superior y va descendiendo hacia el horno. Los gases procedentes del horno circulan en contra corriente de forma ascensional, calentando el material (crudo) alcanzando los 1000°C antes de entrar en el horno.



En Figura 2.33 se ilustra este apartado con el pre-calentador de ciclones instalado en Cementos Alfa (Mataporquera- Cantabria).

En esta parte del proceso; pre-calcinación, previo a la clinkerización se produce la deshidroxilación de las arcillas (pérdida de agua de constitución) y la descarbonatación de las calizas, 550 – 1000°C con formación de CaO y desprendimiento de CO₂, comenzando dicha des carbonatación a los 550°C. Esta reacción continúa en el horno de calcinación y se completa a los 960°C. Ver Figura 2.34 y Tabla 11.



Fig. 2.33. Precalentador ciclones instalado en Cementos Alfa (Mataporquera).

Formación del clinker. Horno de calcinación

Para las reacciones de clinkerización son necesarias altas temperaturas en el horno; normalmente del tipo rotatorio, lo que requiere grandes cantidades de combustible para proporcionar al horno una llama principal de 2000°C.

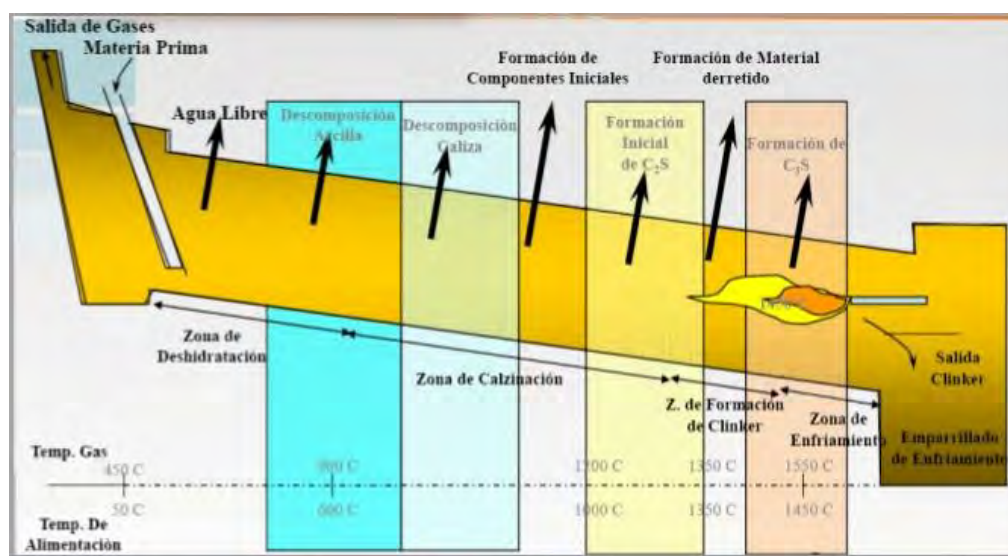


Fig. 2.34. Reacciones de clinkerización en función de la temperatura (Adriano Hernández. Proceso de fabricación del cemento).

A medida que el crudo, procedente del precalentador de ciclones va avanzando hacia el interior del horno, la temperatura va aumentando hasta alcanzar los 1500°C, produciéndose las complejas reacciones de clinkerización.

En Figura 2.34, se observa el tipo de reacciones en función de la temperatura.

Ya se dijo anteriormente que la formación de CaO comenzaba en el precalentador de ciclones a 550°C y acababa en el horno de calcinación hacia los 960°C. Al alcanzar el crudo la temperatura de 1200°C- 1300°C; el CaO reacciona con la sílice generando silicato di cálcico $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S Belita) cuyo compuesto ya tiene carácter hidráulico, aportando al cemento resistencias mecánicas a largo plazo debido a que su hidratación es un proceso lento [16].

A temperaturas superiores a 1280°C, el clinker sólido se funde y el CaO se combina con la alúmina (Al_2O_3) y el óxido férrico (Fe_2O_3) para formar silicato tricalcico $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S Alita) y ferrito- aluminato tetracalcico $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF). Estos dos compuestos ($\text{C}_3\text{S} + \text{C}_4\text{AF}$) a partir de 1380°C, funden junto a una fracción de C_2S y CaO, para dar una masa de consistencia líquida, llamada lava de clinker. Figura 2.35.



Fig. 2.35 Detalle de la lava de clinker
(<http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v75n3/a05v75n3.pdf>).

Esta lava de clinker, es el vehículo en cuyo seno se produce la formación de silicato tricalcico ya que a partir de 1400-1450°C, una parte del C_2S formado previamente reacciona con el CaO restante para producir una disolución sólida de C_3S . Esta Alita, confiere al cemento Portland las más importantes características de resistencia y durabilidad una vez que se hidrata [16].

Hasta ahora se ha visto el procedimiento de clinkerización por vía seca, cuando la materia prima (crudo) entra en forma de polvo y con una humedad entre 0,5 – 1 %. También hay otros procesos que son llamados de vía semi-seca (el crudo entra en forma de pellets y con una humedad entre el 10- 12 %) vía semi- húmeda (crudo alimentado con una humedad del 16 – 21 %) y vía húmeda (crudo con una humedad del 28 – 43 %).

En Tabla 11 se representan las reacciones que tienen lugar durante el proceso de clinkerización, en función de las temperaturas.

Tabla 11. Formación de compuestos de reacción en función de la temperatura.

Proceso	Temperatura °C	Reacción	Lugar
Descarbonatación	550 – 960	$\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	Ciclones y horno de calcinación
Formación de C_2S. Belita	1200 – 1280	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 \Rightarrow 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Horno
Formación de C_3S. Alita	1200 – 1280	$\text{C}_2\text{S} + \text{SiO}_2 \Rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Horno
Formación de C_3A	1200 – 1280	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \Rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Horno
Formación de C_4AF	1200 – 1280	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \Rightarrow 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Horno
Clinker Líquido	>1280	$\text{Clinker}_{\text{sólido}} \Rightarrow \text{Clinker}_{\text{líquido}}$	Horno

El combustible utilizado es principalmente Pet Coke (Coque de petróleo) con un poder calorífico de 8000 – 9000 kcal/kg y otros combustibles procedentes de materiales reciclados para proporcionar calorías procedentes de la valorización de residuos; los cuales convenientemente mezclados con el Pet Coke, proporcionan la energía térmica al horno de calcinación.

Enfriador. Una vez formado el clinker; a la salida del horno tiene que ser enfriado y para ello se emplea un enfriador de parrillas móviles por las que se hace pasar una corriente de aire, la cual enfría rápidamente el clinker de 1400 a 100 °C.; evitando así la reversibilidad de las reacciones del proceso de formación de los silicatos tricalcicos C_3S y dicalcicos C_2S .



Fig. 2.36. Aspecto nódulos de Clinker (civilengineerspk.com).

El aire caliente generado es introducido de nuevo en el horno para mejorar el rendimiento térmico del proceso [17]. En esta fase del proceso, el clinker está formado por pequeños nódulos de color gris de 3 – 4 cm. Figura 2.36

En Tabla 12, se presenta la composición aproximada del clinker [15].

Tabla 12. Composición de Clinker.

Nombre	Formula	Nombre mineral	% peso
Silicato tricalcico. C₃S	3 CaO. SiO ₂	Alita	50 – 70
Silicato bicalcico C₂S	2 CaO. SiO ₂	Belita	15-25
Aluminato tricalcico C₃A	3 CaO. Al ₂ O ₃		5 – 15
Ferrito- aluminato tetracalcico C₄AF	4 CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	Celita	5 - 15

Molienda de clinker y fabricación del cemento

Una vez enfriado el clinker, debe ser molido y solo en ese estado es posible añadirle el yeso y las otras adiciones para conseguir cemento; de la proporción de yeso y de los últimos materiales añadidos a la mezcla será de dónde surja el tipo de cemento que se desea fabricar.

Es conveniente moler el clinker y las adiciones por separado para tener una granulometría más perfecta y una mezcla más homogénea. Los molinos pueden ser de rodillos o de bolas. Los de bolas son cilíndricos que rotan sobre sí mismo y con bolas de acero en su interior de distintos diámetros; normalmente tres tamaños, las bolas grandes hacen la primera fragmentación del material y las pequeñas son las que hacen el final de molienda. En Figura 2.37. Se observa un molino de bolas tipo tubular, que es uno de los más empleados.



Fig. 2.37. Molino tubular de bolas (cement-machine.com.es).

Debido a la rotación del molino, las bolas colisionan entre sí, triturando el clinker y las adiciones, logrando un polvo fino y homogéneo: el cemento.

El tamaño de los sólidos de alimentación al molino suele ser de 25 mm de diámetro y el producto molido suele ser de 0,1 mm de diámetro [17]. Es importante, la buena regulación de la velocidad del molino (rpm) ya que una alta velocidad hace que la acción de las bolas sobre el clinker sea nula, lo mismo que una excesiva baja velocidad.

Almacenamiento del cemento.

El cemento se almacena en silos separados según las diferentes clases.

Envasado y expedición a granel.

El envasado se suele hacer en sacos de papel de 25-35 Kg y colocado en pallets; para las expediciones a granel se utilizan camiones, ferrocarril y barco.



2.3.5. Problemática derivada de la fabricación del cemento Portland

A lo largo de este punto, se abordarán los problemas ambientales acarreados por la industria cementera, destacando la gran cantidad de energía consumida, así como el CO₂ liberado durante su fabricación. Además, la obtención de materias primas implica la destrucción de ciertos hábitats, así como contaminaciones del aire y agua de la zona.



Fig. 2.38 Explotación de cantera de Cementos Portland Valderribas.

Modificación del paisaje. De todos es conocido, el impacto que genera una fábrica de cemento para obtener su materia prima; un paisaje, se convierte en un desierto árido y lleno de excavadoras Figura 2.38. Aunque el impacto visual es difícil de cuantificar, lo que no cabe duda es que una cantera explotada no vuelve a recuperar su integridad inicial.

Para hacernos una idea de la dimensión del problema, se tiene en cuenta los siguientes datos [15]. Una producción de 100.000 toneladas de cemento, necesita un consumo de 4.000.000 de toneladas de terreno explotado para conseguir las materias primas. Si se asemeja a una colina que contenga esa cantidad de material; resultaría un cono de 125 m de alto y 250 m de diámetro de la base.

A parte de este tema de explotación del terreno, también debemos tener en cuenta el tema de los recursos minerales, los cuales son finitos y no inagotables. En España; estas actividades están reguladas por el Real Decreto 1/2008, el cual regula las condiciones en que debe quedar el terreno una vez concluida la explotación. Normalmente para conseguir minimizar el impacto ambiental se recurre a la revegetación de la zona; pero lo que también es cierto es que cada día hay más colectivos ecologistas pidiendo un control más efectivo de las canteras y su posterior recuperación.

Emisión de partículas. Uno de los focos de contaminación es la emisión de partículas en suspensión a la atmosfera. De todos es conocido, el aspecto que tenía no hace mucho tiempo el pueblo cántabro de Mataporquera por el efecto de la cementera allí instalada; afortunadamente esto ha ido cambiando mucho a lo largo del tiempo ya que actualmente existen una amplia gama de filtros que evitan que el polvo sea expulsado al exterior del horno de calcinación. También existen electro-filtros en las instalaciones de molienda, filtros de mangas en las trituradoras y en los silos de almacenaje de materiales. Estas emisiones de polvo a la atmosfera están reguladas por el Real decreto 100/2011.

Emisión de gases. Actualmente hay un gran consenso científico sobre el calentamiento global, el cual está causado principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero, relacionados con la actividad humana, traduciéndose en consecuencias graves para ecosistemas únicos, fenómenos meteorológicos extremos, aumento del nivel del mar, desaparición de glaciares, disminución del hielo de los polos, etc.

De entre estos gases de efecto invernadero, se pueden citar el CO₂, CH₄ y los NO_x, pero en este trabajo nos vamos a referir principalmente al CO₂ ya que es el más abundante entre todos estos gases de efecto invernadero.

Antes de 1750; antes de la Revolución Industrial, en la atmosfera existía una concentración de CO₂ de 280 ppm y recientemente estamos alrededor de 400 ppm. Decía la física Lourdes Vega (Premio de Innovación y Tecnología 2013 de la Real Sociedad de Física y la Fundación BBVA) “El CO₂ es bueno. Lo comes, lo bebes, lo utilizas para apagar fuegos. No es malo, lo que ocurre es que hay un exceso de él en la atmosfera”.

El proceso de fabricación del cemento Portland siempre ha estado clasificado como una de las principales fuentes de emisión de CO₂ entre las actividades industriales y a nivel global es el causante del 5 al 7 % del total de emisiones.

El principal foco de emisiones de CO₂ es el horno de calcinación debido principalmente

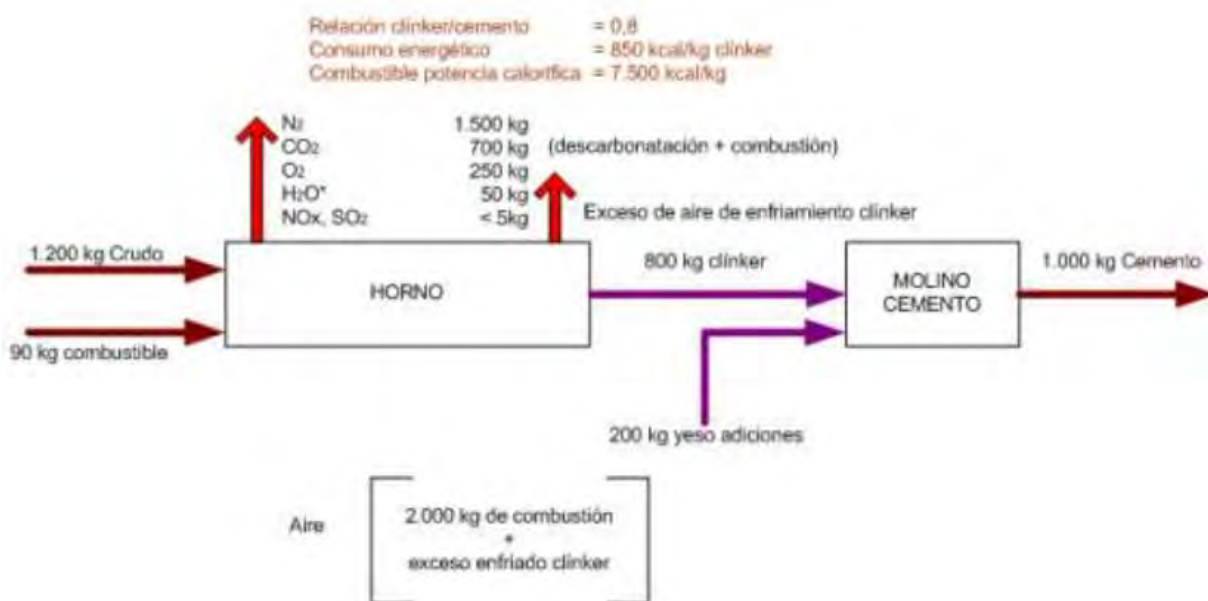
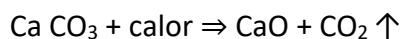


Fig. 2.39. Proceso de fabricación de 1000 kg de cemento (García Calle, R., 2016).

a la reacción de descarbonatación de la caliza y a la combustión del horno. En Figura 2.39 se detalla el balance de materiales de entrada y salida, así como los gases generados para producir 1000 kg de cemento, información de OFICEMEN [11].

El clinker es muy rico en CaO, procedente de la descarbonatación de la caliza en virtud de la reacción química de calcinación de dicha caliza:



Otra parte del CO₂ procede de los combustibles necesarios para obtener las altas temperaturas de la llama del horno (2000°C) para mantener temperaturas de 1500°C en el interior de dicho horno. Si combinamos ambas fuentes de emisión de CO₂, para la producción de 1 tonelada de cemento se emiten 850 kg de CO₂ a la atmosfera [15].

No obstante, también se debe decir que a pesar de la contaminación que genera una fábrica de cemento, el proceso de producción es bastante favorable a la valorización de residuos, tanto como materias primas para el clinker como en adiciones posteriores para los diferentes cementos o en la valorización energética de neumáticos, basura doméstica, madera, etc. convenientemente mezcladas con el combustible principal.

Si combinamos ambas fuentes de emisión de CO₂, para la producción de 1 tonelada de cemento se emiten 850 kg de CO₂ a la atmosfera [15].

2.3.6. Adiciones y tipos de cementos Portland

El cemento Portland se obtiene mezclando clinker con yeso y aquellas adiciones y aditivos que dosificamos según el uso que vaya a tener. Básicamente podemos decir que un cemento Portland está compuesto de las siguientes partes:

- . Núcleo: Formado por el clinker, las adiciones principales > 5% y las adiciones minoritarias < 5%.

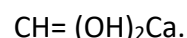
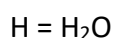
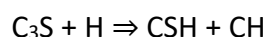
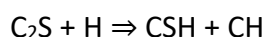
- . Sulfato cálcico di hidratado (Yeso) que actúa como regulador del fraguado y cuya dosificación es < 5% con relación al peso del núcleo.

- . Aditivos de molienda en cantidades < 1% con relación al peso del núcleo.

Como se ha visto anteriormente; todo cemento Portland, lleva asociado yeso para regular el tiempo de fraguado y antes de seguir con las adiciones se cree conveniente explicar en qué consiste el fraguado.

El fraguado es un proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del cemento, debido a la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos como consecuencia de la reacción química del agua con los óxidos metálicos presentes en el clinker. Esta reacción química, cemento – agua (hidratación) es exotérmica, libera calor y la completa hidratación depende de la composición química del clinker y su porcentaje de participación en el cemento.

Los componentes del cemento C₃A, C₄AF, C₃S y C₂S; se hidratan a distinta velocidad, iniciándose en el C₃A y continuando por el C₄AF, C₃S y C₂S por este orden. Las reacciones químicas que se producen son muy complejas y hay teorías distintas sobre su mecanismo, pero la más aceptada es la de formación de geles de silicatos cálcicos hidratados en función de las siguientes reacciones básicas:



El C₃S reacciona rápidamente con el agua y también el C₃A, produciéndose un rápido endurecimiento. Para evitar este fraguado rápido y hacer la mezcla más trabajable, se

añade al clinker yeso, el cual disminuye la solubilidad del aluminato al existir en ese momento cal y yeso en disolución.

Para comenzar con el tema de las adiciones, se debe preguntar dos cuestiones ¿Qué son? Y ¿Para qué se utilizan?

Las adiciones son en general subproductos minerales procedentes de otros procesos y materiales de origen natural o artificial que se incorporan al cemento con objeto de mejorar sus propiedades físico – químicas. La utilización de estas adiciones al clinker de los cementos, obedece a tres razones de distinto concepto: tecnológico, ecológico y económico [19]. De orden tecnológico porque los cementos con adiciones carecen de algunas de las deficiencias del Portland y aportan otras ventajas que el Portland ordinario no tiene para usos específicos; por ejemplo, los cementos puzolánicos en presas y los siderúrgicos en obras marítimas [19].

De orden ecológico, ya que la utilización de estos subproductos como adiciones supone la eliminación de escombreras, disminuye la relación clinker / cemento consiguiendo una menor fabricación de clinker y por consiguiente una menor cantidad de materias primas y menores emisiones de CO₂. De orden económico, puesto que mediante estas adiciones se disminuye el costo y se consigue un ahorro de extracción de materias primas y de gasto energético de la fabricación del clinker. [19]

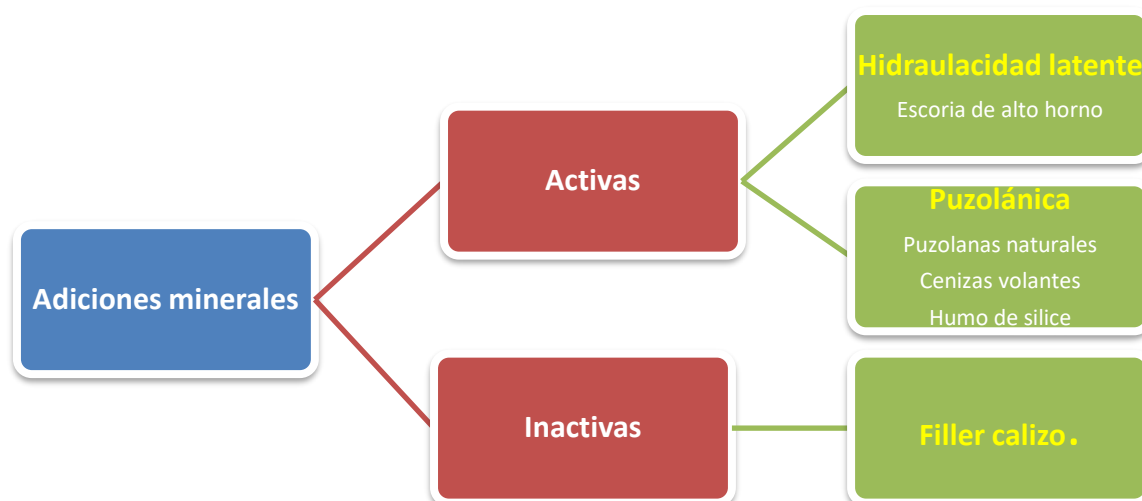


Fig.2.40 Clasificación de las adiciones al cemento.

Las adiciones minerales se pueden clasificar en activas e inactivas, como se representa esquemáticamente en Figura 2.40. Las adiciones activas son aquellas que tienen la capacidad de hidratarse y formar compuestos de silicatos cálcicos hidratados SCH de forma semejante a los formados en la hidratación del clinker Portland. A su vez, las activas se dividen en las que tienen hidraulicidad latente; debido a que tienen la

capacidad de hidratarse por si mismas en presencia de agua (escorias de alto horno) y las puzolánicas.

Las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos que por si solos no tienen apenas propiedades cementantes, pero cuando estan finamente divididos y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el $(OH)_2Ca$ formando compuestos SCH cementantes.

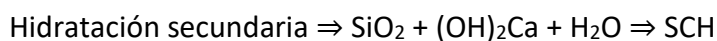
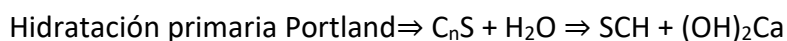
Las adiciones inactivas no generan SCH pero tienen influencia sobre la hidratación de las partículas del clinker.

A continuación se ven algunos de estos subproductos; características y procedencia.

Escorias de alto horno. Se forman como subproducto siderurgico de la obtención del arrabio como consecuencia de la reacción en alto horno de la mena del mineral de hierro, de la ganga de dicho mineral, el coque y la caliza dolomítica utilizado como fundente. Contiene silico – aluminatos calcicos y magnesicos principalmente, los cuales son muy deseables como adición al clinker.[19]

La escoria debe ser granulada y esto se produce mediante el enfriamiento violento con agua a presión, permaneciendo sus compuestos minerales en estado vitreo lo que la hace tener una hidraulicidad latente. La escoria enfriada al aire no presenta esta propiedad ya que su estructura no es vitrea.[19]

Materiales puzolánicos. Se dijo anteriormente que eran capaces de reaccionar con productos originados en la hidratación primaria del cemento Portland $(OH)_2Ca$, dando lugar a geles de SCH.



Entre los materiales puzolánicos podemos citar:

.Puzolanas naturales que tienen generalmente origen volcanico como las rocas tobas (rocas igneas volcanicas, porosa y ligera) o las tierras de diatomeas (roca sedimentaria silicea).

.Cenizas volantes que son subproductos de los hornos que emplean carbón para generar energía. En función de la procedencia del carbón, las cenizas serán antraciticas, bituminosas, ligniticas y son preferidas en las cementeras las bituminosas. Su composición química es variable, dependiendo del carbon de procedencia pero similar a los minerales de la arcilla.

.Humo de silice, material puzolánico y es un subproducto que se origina en la reducción del cuarzo con carbón en hornos electricos de arco para la fabricación de aleaciones de

silicio y ferrosilicio. También es llamado microsilice o silice activa y está formado por partículas esféricas de una gran finura. El polvo es recogido en filtros de mangas y su porcentaje en SiO_2 es $> 85\%$.

Las adiciones al clinker no son mayores del 10%.

Filler calizo. Material compuesto principalmente de CO_3Ca que se adiciona al cemento o se muele conjuntamente con el clinker. El filler es material finamente dividido $< 100 \mu\text{m}$ y ejerce beneficios sobre todo en morteros y hormigones frescos.

En cuanto a la clasificación de los cementos, se va a hacer siguiendo el Real Decreto 256/2016 de 10 de Junio, en el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos RC16[20]. Los tipos de cementos incluidos en esta instrucción son los sujetos al marcado CE y los sujetos al Real Decreto 1313/1988. Los sujetos al marcado CE, se consideran comunes según la norma UNE- EN 197-1.

El cemento Portland se designará con las siglas CEM I, seguidas de la clase de resistencia (32,5 – 42,5 – 52,5), un espacio en blanco y la letra (R) si es de alta resistencia o la letra (N) si es de resistencia inicial normal.

Los Portland con adiciones se designaran con las siglas CEM II, seguidas de una barra (/) y de la letra que indica el subtipo (A o B) separada por un guión (-) de la letra identificativa del componente principal empleado como adición del cemento. Estas letras identificativas de las adiciones son las siguientes:

S = Escoria de alto horno.

D = Humo de silice.

P = Pozolana natural.

Q = Pozolana natural calcinada.

V = Ceniza volante silicea.

W = Ceniza volante calcárea.

T = Esquistos calcinados.

L y LL = Filler calizo.

Los cementos de alto horno, pozolánicos y compuestos se designan con las siglas CEM III, CEM IV y CEM V, como se indica en la Tabla 13 [20].

La Instrucción R16, define también los tipos de cemento que se pueden utilizar en construcción, dependiendo de su composición:

CEM I (Cemento Portland). Más del 95% de clinker. Sus aplicaciones más importantes son en hormigones de muy alta resistencia, obras públicas en hormigón pretensado y fabricación de elementos de hormigón.

CEM II. Entre 65 – 94% de clinker, el resto adiciones. Las aplicaciones principales son en hormigones y morteros en general.

CEM III. (cemento de alto horno). Entre 20 – 64 % de clinker y 36 – 80 % de escoria. Las aplicaciones principales son en hormigones en ambientes agresivos; terrenos con sulfatos y agua de mar.

Tabla 13. Clasificación de cementos comunes.

Cementos comunes (CEM)

Tipos principales	Designación de los 27 productos (tipos de cementos comunes)		Composición (proporción en masa)										Componentes minoritarios	
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados T	Caliza			
						natural P	natural calcinada Q	silíceas V	calcáreas W		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
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		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 esquistos calcinados	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 mixto	CEM II/A-M	80-94	<----- 6-20 ----->										0-5
CEM II/B-M		65-79	<----- 21-35 ----->										0-5	
CEM III	Cemento con escorias 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	CEM IV/A	65-89	—	<----- 11-35 ----->					—	—	—	0-5	
		CEM IV/B	45-64	—	<----- 36-55 ----->					—	—	—	0-5	
CEM V	Cemento compuesto	CEM V/A	40-64	18-30	—	<----- 18-30 ----->			—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	—	<----- 31-50 ----->			—	—	—	—	0-5	

CEM IV (Cemento puzolánico). 45 – 89 % de clinker y 11 – 55 % humo de sílice o puzolana natural o cenizas volantes o combinación de ellas. Sus aplicaciones principales son en hormigones y morteros en general en ambientes ácidos moderadamente agresivos y en obras hidráulicas.

CEM V (Cemento compuesto). 20 – 64 % clinker, 18 – 50 % escoria de alto horno y el resto puzolana natural o cenizas volantes o una combinación de estas. Las aplicaciones principales son en estabilización de suelos y terrenos, bases tratadas para carreteras y firmes de hormigón y en grandes macizos de hormigón en presas.

En cuanto a la resistencia a compresión, los cementos comunes se pueden clasificar atendiendo a su resistencia a los 28 días expresada en MPa 32,5 – 42,5 – 52,5 y seguidos de las letras R,N,L.

R = Alta resistencia inicial. N = Resistencia inicial normal. L = Baja resistencia inicial.

Vistas todas estas clasificaciones; como final de este capítulo, me parece apropiado familiarizarme con la nomenclatura de los cementos en base a la clasificación de la tabla 13 y según la norma UNE- EN 197-1, con algunos ejemplos [20].

CEMI 42,5 R. Cemento Portland de clase resistente 42,5 y alta resistencia inicial (R).

CEM II/A – L 32,5 N. Cemento Portland, subtipo A, clinker 80 – 94 % con un contenido entre 6 – 20 % en masa caliza, de clase resistente 32,5 y resistencia inicial normal (N).

CEM II/A – M (S-V-L) 32,5 R. Cemento Portland compuesto. Contenido en clinker 60 – 68 % con un 6 – 20 % de contenido de escoria de alto horno (S) ceniza volante (V) y caliza (L). Clase resistente 32,5 y alta resistencia inicial.

CEM III/B 32,5 L. Cemento de alto horno. 20 – 34 % de clinker, 66 – 80 % en masa de escoria de alto horno, resistencia de 32,5 y baja resistencia inicial.

2.4 Morteros y hormigones

En primer lugar, vamos a ver el origen etimológico de ambas palabras “Morteros” y “Hormigones o Concretos”. La palabra mortero, viene del latín “mortarium” que significa cajón de metal usado para mezclar materiales, como cal y arena.

La palabra hormigón, procede del término latino “formico” que significa moldeable o dar forma. El término concreto, también procede del latín, de la palabra “concretus” que significa crecer juntos o unir.

Anteriormente se ha hablado del cemento; pues bien, los cementos se emplean fundamentalmente para elaborar morteros y hormigones cuando se mezclan con áridos y agua, obteniéndose con ellos elementos constructivos. La parte de conglomerante, una vez hidratada, forma el nexo de unión, actuando como suministrador de resistencias mecánicas.

2.4.1 Morteros

2.4.1.1 Desarrollo histórico del mortero

El origen de los morteros hay que buscarlos en el origen de la civilización misma como resultado de asentamientos en ciudades de grupos humanos dedicados a la agricultura durante el Neolítico, pasando de ser nómadas a sedentarios.

En mi opinión, el desarrollo histórico de los morteros ha ido ligado a los propios descubrimientos de agentes aglomerantes; bien de origen natural o artificial.

El origen del mortero de cal, parece que se remonta a la época neolítica, muy posteriormente utilizado por griegos y experimentando un importante desarrollo en la civilización romana. Los romanos utilizaban morteros como material de unión entre piezas de piedra o ladrillo y con el paso del tiempo inventaron un mortero cuyo aglomerante principal era la cal aérea $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o cal apagada mezclada con polvo de rocas volcánicas y de cerámica al que llamaron mortero de cal hidráulica o mortero puzolánico.

Los egipcios eran muy conocedores del mortero de yeso, pero no del de cal ya que no disponían de este material. Con posterioridad a la civilización romana; caída del Imperio Romano de Occidente en el siglo V; Edad Media, se produce un retroceso cultural y tecnológico en Europa y los morteros empleados son de mala calidad y formados principalmente por cal aérea y yeso (morteros bastardos).

En la segunda mitad del siglo XVIII, es cuando la cal aérea es sustituida por cales hidráulicas y posteriormente por cementos tipo Portland y otros tipos de cementos.

2.4.1.2 Definición de morteros

En primer lugar, vemos la diferencia entre cemento y mortero. El cemento es una mezcla de caliza y arcilla, calcinada y molida y cuyo polvo resultante en combinación con agua y yeso forma una pasta blanda que en contacto con el agua quedará dura. El mortero contiene la misma mezcla que el cemento, pero con el añadido de arena y agua. Dicho esto, se puede acudir a la definición de mortero [21] que dice que mortero es la mezcla constituida por arena, un conglomerante y agua, empleándose como aglomerante el cemento, el yeso y la cal, los cuales pueden utilizarse solos o combinados y en el caso que la mezcla lleve dos o más tipos de aglomerante; el mortero se llama mixto.

Otra definición, es la dada en Tecnología de Materiales [23] la cual dice que un mortero es un compuesto de conglomerantes inorgánicos, agregados finos y agua con posibles aditivos, que sirven para pegar elementos de construcción como ladrillos, piedras, bloques de hormigón, etc.



Fig. 2.41 Ejemplo de utilización de morteros (Morteros: Tipos, Proporciones y Usos frecuentes/Ideas de rehabilitación proyectos habitissimo.es).

Los morteros más comunes actualmente son los que utilizan el cemento como aglomerante y están compuestos de cemento, agregado fino y agua, utilizándose en albañilería como material de agarre, Figura 2.41, y revestimiento de paredes y suelos.

También es cierto que los morteros una resistencia menor que el hormigón, pero tienen sin embargo la capacidad de retener agua y un alto contenido de aire; lo cual significa que cuando las temperaturas están próximas o por debajo del punto de congelación del agua (0°C) este se congela y en consecuencia aumenta de volumen, el cual es absorbido por las burbujas de aire, evitando que el mortero se agriete (heladicidad).

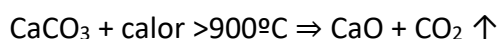
2.4.1.3. Clasificación de los morteros

Se pueden distinguir 5 tipos de morteros [22].

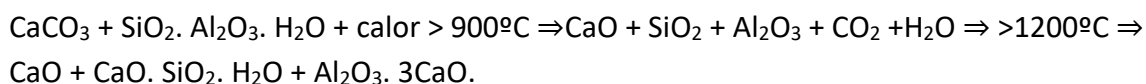
Morteros con un solo aglomerante, los cuales a su vez pueden ser:

Morteros de cal Son aquellos que están fabricados con cal, arena y agua. La cal empleada puede ser aérea o hidráulica. Siempre que hablemos de cal nos estamos refiriendo al óxido de calcio CaO.

La cal aérea y la cal hidráulica se diferencian tanto en su composición como en su fabricación y en su fraguado [25]. La cal aérea tiene un % en CaO superior al 90% y menos de 5,3% de arcilla; obteniéndose de la piedra caliza CaCO_3 de alta pureza. Su proceso de fabricación se basa en la calcinación del CaCO_3 a temperaturas superiores a 900°C

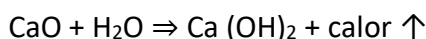


La cal hidráulica contiene un % de CaO menor del 50% y más de 5,3 % de arcillas. Se obtiene a partir de calizas menos puras, siendo su proceso de fabricación el siguiente:



Ca. $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ = Silicato cálcico (CSH) $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$ = Aluminato cálcico (CAC)

Como se ve en ambos procesos, se obtiene CaO (cal viva) la cual no tiene aplicación directa en construcción ya que en contacto con el H_2O reacciona exotérmicamente, desprendiendo calor y aumentando de volumen produciendo caliches; por lo tanto, la CaO (cal viva) para su uso en construcción requiere la operación de “apagado” con agua, produciéndose la siguiente reacción:



Al ser una reacción exotérmica, siempre hay que ir añadiendo el CaO sobre el agua, poco a poco y no al revés. Según lo expuesto; tanto la cal aérea como la hidráulica, necesitan para su uso de un apagado y lo que realmente utilizamos es $(\text{OH})_2\text{Ca}$ de distinta procedencia según el % de CaO.

La cal aérea, fragua en contacto con el CO_2 del aire ya que a medida que su agua se va perdiendo por evaporación, absorbe CO_2 y se endurece; en realidad es un proceso inverso a su formación, desplazando la reacción a la formación de CaCO_3 .

La cal hidráulica, tiene compuestos cementosos que fraguan por hidratación (CSH y CAC) y $(\text{OH})_2\text{Ca}$ que necesita CO_2 para fraguar, por lo tanto, se trata de un fraguado mixto con agua y CO_2 .

Los morteros de cal aérea sirven para hacer revoques finos y para encalar las paredes como lechada de cal y los de cal hidráulica para hacer revoques gruesos, unir ladrillos y hacer diferentes morteros Figura 2.42



Fig.2.42 Mortero de cal (Morteros de cal para la construcción sostenible. Ingurubide.org).

Morteros de yeso. Son los morteros elaborados con yeso, arena y agua. Son morteros menos resistentes, pero tienen la particularidad de endurecer rápidamente. Figura 2.43 Se suelen utilizar para fijar elementos de obra y nunca se deben utilizar donde se intuya que puede haber humedad ya que el yeso tiene una gran capacidad de absorción de agua [23].



Fig.2.43 Mortero de yeso (es.123rf.com).

Morteros de cemento. Son los formados con cemento como aglomerante, arena y agua. Figura 2.44 Es importante durante la fabricación de los morteros la dosificación de los materiales; morteros pobres son los que tienen poco cemento, tienen poca adherencia y son difíciles de trabajar, mientras los que tienen gran cantidad de cemento se retraen y muestran fisuras



Fig. 2.44 Mortero de cemento Portland (oficemen).

También a estos morteros, se les suele añadir elementos plastificantes para mejorar su trabajabilidad [23]. Este mortero, es uno de los materiales de construcción usado principalmente ya que sirve para aparejar elementos de construcción como ladrillos, bloques, para rellenar los espacios que quedan entre los bloques y para revestir paredes.

Un mortero muy común, es el basado en el cemento Portland y un mortero muy especial se le puede considerar al hormigón ya que a los componentes propios del mortero de cemento se le añade grava.

Morteros mixtos o bastardos. Son aquellos en los que intervienen dos aglomerantes, *como yeso y cal o cemento y cal*. Así un mortero de cemento y cal está compuesto por cemento, cal, arena y agua; combinando las de los dos conglomerantes, así si tiene más cemento que cal será más resistente. Estos morteros también pueden ser aéreos o hidráulicos según la procedencia del CaO.

Morteros especiales. También llamados morteros Justacken [22] y entre ellos se pueden citar: morteros refractarios, morteros ignífugos, morteros hidrófugos y morteros autonivelantes.

De este tipo de morteros; autonivelantes, me voy a extender ya que, en la investigación a desarrollar, uno de los posibles usos del residuo cerámico es precisamente en la fabricación de este tipo de morteros.

El mortero autonivelante [26] es un mortero especial, muy líquido, utilizado como base para diversos tipos de suelos, tarimas flotantes, etc. este tipo de morteros se empezaron a desarrollar en la década de los 70 y se componen de cemento, arena silíceo gruesa de tamaño 2 mm, arena fina caliza o filler < 100 μ m, agua y aditivos.

Los aditivos más utilizados son los plastificantes y fluidificantes; los cuales ayudan a obtener un material más fluido y fácil de extender. A pesar de su nombre, este tipo de morteros no se nivelan ellos solos, ya que es necesario alisarlos manualmente. La consistencia de estos morteros autonivelantes se determina por medio de la mesa de sacudidas, cuyo procedimiento se desarrolla en la norma UNE-EN 1015-3. La consistencia se expresa por el escurrido en mm del valor medio del diámetro de la probeta de mortero fresco ensayado [24]. En los autonivelantes, en estado fresco, se le considera un mortero fluido si su escurrimiento es > 200 mm. En Figura 2.45 se representa un mortero autonivelante.



Fig. 2.45 Mortero autonivelante (surfaceremovalsystem.com).

2.4.1.4. Características exigibles a un mortero

En mi opinión, creo que se debe diferenciar entre los requisitos exigibles para el trabajo en la construcción y los requisitos técnicos soportados por normas; tanto en estado fresco como endurecido.

Dentro de los requisitos para su trabajabilidad se pueden citar [23] [24] los siguientes:

Sea una mezcla unida.

Esparcirse con facilidad.

Trabajabilidad que permita el tiempo suficiente para colocar los ladrillos y ajustarlos en línea y nivel

Pegarse al ladrillo.

Endurecerse lo suficientemente rápido que permita trabajar a un ritmo razonable.

Resistir la penetración del agua.

Resistencia para soportar las cargas que han de actuar sobre el muro o fábrica.

Durabilidad de acuerdo con las condiciones a las que va a ser expuesto.

Dentro de los requisitos técnicos podemos citar los siguientes según el estado físico del mortero; fresco o endurecido [24] [27].

En estado fresco corresponderá a un mortero mezclado y amasado hasta que endurece con el fraguado; es decir en este estado el mortero es plástico y trabajable y una vez superada esta fase, el mortero fragua y se endurece. Entre las características del mortero fresco se pueden citar:

La consistencia que define la trabajabilidad y manejabilidad del mortero, consiguiendo la consistencia adecuada con la adición de más o menos agua, cantidad de finos y aditivos. Se determina por la mesa de sacudidas Figura 2.46, de acuerdo con la norma UNE-EN 1015-3.

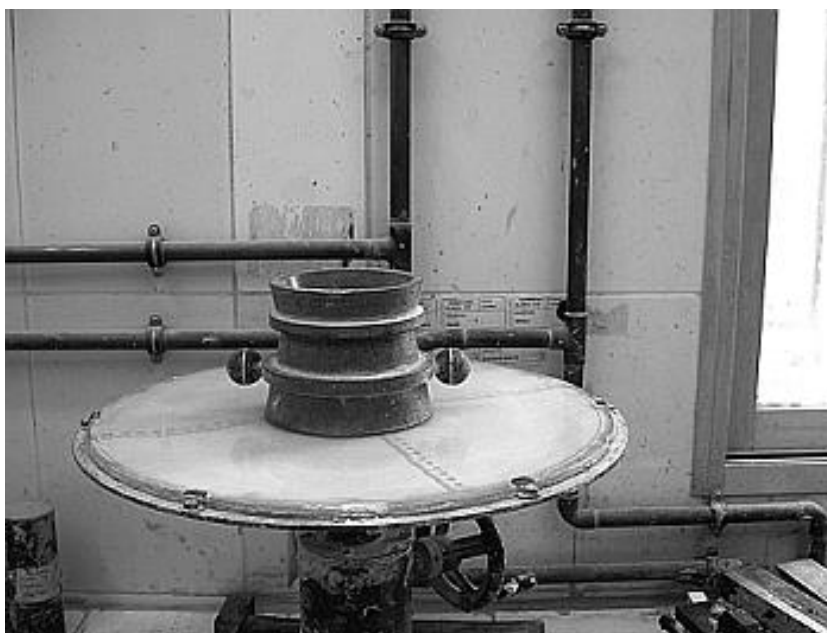


Fig.2.46 Mesa de sacudidas y molde

(<https://es.scribd.com/document/350493041/Cono-de-Abrams-Mesa-de-Sacudidas-docx>).

El valor se determina por el valor medio en mm del diámetro de la probeta o torta Figura 2.47 y en función del resultado se distinguen tres tipos de consistencia. Tabla 14.

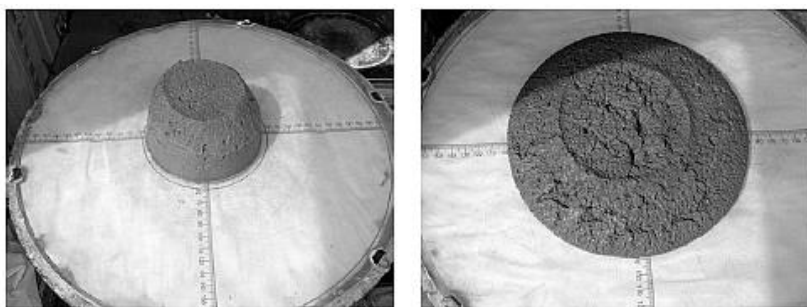


Fig.2.47 Probeta y torta antes y después del ensayo.

Tabla 14 Tipos de consistencia de un mortero.

Mortero fresco	Escurrecimiento en mm	Designación
Seco	< 140 mm	S
Plástico	140-200 mm	P
Fluido	> 200 mm	F

El tiempo de uso, es el tiempo en el cual el mortero tiene suficiente trabajabilidad para ser utilizado antes de su endurecimiento por el fraguado. Se determina según la norma UNE-EN 1015-9 y se mide el tiempo en minutos a partir del cual el mortero opone resistencia a ser penetrado por una sonda.

Densidad. Este parámetro está directamente relacionado con la de los componentes que se han utilizado en la fabricación de ese mortero. Se determina según norma UNE-EN 1015-6.

La adherencia es la resistencia del mortero sobre el soporte, siendo mayor cuanto mayor es la proporción de aglomerante o de finos.

Contenido de iones cloruro. Estos iones Cl^- son solubles en el agua de amasado y pueden influir en el proceso de corrosión en el caso de existir armaduras de hierro y en la aparición de eflorescencias. Para los morteros armados es necesario hacer el ensayo según norma UNE-EN 1015-17.

Capacidad de retención de agua. Los morteros tienden a conservar el agua para hidratar las partículas de aglomerante, árido y las burbujas de aire. El agua en exceso lo cede por succión al soporte sobre el que se aplique dicho mortero. La retención de agua influye en el grado de hidratación del aglutinante y en el endurecimiento del mortero. De esta propiedad se explica que al aplicar mortero a un soporte (pared) este debe estar humedecido para evitar la captura de agua de amasado.

El mortero endurecido, deberá tener a su vez, una serie de exigencias entre las que se indican las siguientes:

Resistencia mecánica. La resistencia de un mortero influirá en la capacidad de soportar cargas a las que se vean sometidos. Para su cálculo es necesario realizar ensayos de rotura a flexión y compresión de probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm de 7 y 28 días de edad según la norma UNE-EN 1015-11.

Estos ensayos son realizados en prensas neumáticas con los utillajes apropiados Figura 2.48



Fig. 2.48 Ensayos de rotura a flexión y compresión (www.ibertest.es).

Los morteros se designarán según su resistencia a compresión a 28 días, medida en N/mm^2 (MPa) anteponiendo la letra M. M-1; M-2,5; M-10, M-20 y Md cuando la resistencia a la compresión es mayor de 25 MPa.

Adherencia. Se basa en la resistencia a la tracción de la unión entre un mortero y un soporte. Se determina con un ensayo de arrancamiento directo y perpendicular a la superficie del mortero, siendo en el caso de los morteros de albañilería mediante la aplicación de la norma UNE-EN 1015-12. Ver ensayo en Figura 2.49.



Fig. 2.49 Ensayo adherencia del mortero endurecido (www.ipc.org.es).

Retracción. Se trata de una contracción que experimenta el mortero por disminución de volumen durante el proceso de fraguado y principio del endurecimiento y es debida a la pérdida de agua sobrante tras la hidratación del mortero. Existen tres tipos de retracción: plástica, hidráulica y térmica y estas son más elevadas cuanto más cemento y finos contienen los morteros. Se identifican por pequeñas fisuras que aparecen en la superficie del mortero, Figura 2.50. Si estas fisuras son muy pronunciadas, pueden dejar abiertas vías de penetración de agua.



Fig. 2.50 Fisuras de retracción plástica (oficemen.com).

2.4.1.5. Dosificación y amasado de morteros

Se entiende por dosificación del mortero, la relación entre la cantidad de conglomerante y cantidad de arena [21]; pudiendo ser tanto en peso como en volumen. En función de dicha dosificación, los morteros pueden ser:

Mortero normal, constituido por una parte de conglomerante por cada tres de arena, de modo que el conglomerante rellene los vacíos existentes en la arena.

Mortero magro, cuando el volumen de conglomerante es insuficiente para rellenar los huecos del volumen de arena empleado, tiene poco conglomerante.

Mortero graso, cuando el volumen de conglomerante es superior al de los huecos que presenta la arena.

En cuanto a la dosificación, solo voy a tener en cuenta los morteros de cemento ya que son los que vamos a trabajar en la parte experimental de este trabajo de investigación.

Al preparar un mortero, lo primero que debemos tener en cuenta, son las proporciones de cada uno de los elementos a mezclar y seguidamente el amasado. Una dosificación básica de un mortero es la relación 1: 3 de cemento y arena como se indica en la Figura 2.51



Fig. 2.51 Dosificación básica de un mortero

(https://www.youtube.com/watch?v=eXN7Cnvo4Lw&t=3s&ab_channel=profeort).

Siguiendo con esta dosificación básica y convirtiéndola en cantidades de materiales, se confecciona la siguiente dosificación según Tabla 15 para cemento Portland como aglomerante.

Tabla.15. Dosificación de mortero con cemento Portland.

Material	Dosificación en gramos
Cemento	450 ± 2 g
Arena 0 – 5 mm	1350 ± 5 g
Agua	225 ± 1 g

Como se ve en la tabla, la cantidad de arena es tres veces la de cemento y la de agua es $\frac{1}{2}$ la de cemento. También debemos de tener en cuenta que, en función de la dosificación, el mortero que preparemos tendrá distintas resistencias mecánicas a compresión [21] como se indica en Tabla 16.

Tabla 16. Resistencia de morteros de cemento según dosificación.

RESISTENCIA DE MORTEROS DE CEMENTO		
Dosificación	Cemento (kg/m ³)	Resistencia (N/mm ²)
1:10	161	3,0
1:8	197	5,0
1:6	255	7,5
1:4	361	13,0
1:3	455	16,0

Estas dosificaciones, en laboratorio es fácil hacerlas porque existen útiles precisos con los que pesar o medir volúmenes; en obras se suelen utilizar medidas como la palada y al tratarse el mortero de una mezcla proporcional, las cantidades se pueden doblar, triplicar, dividir, etc.

Otro aspecto a tener en cuenta es el método de mezcla y amasado del mortero. El método tradicional es a mano; bien en carretilla o en el suelo, mezclando primero los materiales secos (cemento y arena) y creando una montaña; posteriormente se hace un hueco en el centro, donde se añade el agua correspondiente. Todo esto es mezclado con una pala o azada y se sigue añadiendo agua hasta conseguir la textura correcta. Para grandes cantidades en obras, también existen mezcladoras de forma cilíndrica con brazos en el interior, donde se van suministrando primero los productos secos y posteriormente se dosifica el agua.

A nivel de laboratorio, el amasado está muy estandarizado, tanto en útiles como en procedimiento. El útil apropiado es una amasadora como la representada en la Figura 2.52



Fig. 2.52 Amasadora de morteros de laboratorio (www.ibertest.es).

Para el amasado, el procedimiento a seguir es el indicado en la norma UNE-EN-196-1, el cual nos indica los siguientes pasos a seguir:

- 1.- Se colocan en el cuenco de la amasadora mecánica el agua y el cemento.
- 2.- Colocamos el cuenco en la amasadora y amasamos a velocidad lenta 30".
- 3.- Durante los siguientes 30" y también a velocidad lenta, añadimos la totalidad de la arena.
- 4.- A continuación, dejamos que amase a velocidad rápida 30".
- 5.- Paramos la amasadora durante 90".
- 6.- Terminado el tiempo de reposo continuamos amasando a velocidad rápida durante 60" más.
- 7.- En ese momento el mortero estará listo para su utilización.

2.4.2 Hormigón

2.4.2.1 Breve historia del hormigón

Tanto en la civilización griega como romana, se utilizaron hormigones a partir de aglomerantes naturales mezclados con piedras trituradas e incluso con materiales de baja densidad como la piedra pómez.

Con la invención del cemento Portland en 1824 y sobre todo a principios del siglo XX con el rápido crecimiento de la industria cementera; debido principalmente a la invención de los hornos rotatorios, molinos tubulares y el método de transporte del hormigón fresco; se comenzó a elaborar cemento Portland en grandes cantidades y su uso masivo en la construcción. Podemos decir que el siglo XX, es el siglo del auge del hormigón en sus muchas variantes (armado, fibras, monómeros, etc.) y estos grandes progresos en los comportamientos del hormigón han posibilitado la construcción de grandes rascacielos, puentes, presas, carreteras, etc.

2.4.2.2 Importancia del hormigón en nuestra sociedad

El hormigón es el material de construcción que más se utiliza actualmente a nivel mundial ya que es un material de fácil fabricación, relativamente económico y de una gran durabilidad y resistencia. También se trata de un material que tiene una gran capacidad de adaptación y de una alta disponibilidad ya que puede ser fabricado en cualquier parte del mundo. Todas estas cuestiones, han hecho posible, que el hormigón sea la sustancia más utilizada en el planeta después del agua.

También el hormigón; actualmente está empezando a tener mala fama, ya que uno de sus componentes principales, el cemento, deja una importante huella ecológica; alrededor del 8% de las emisiones mundiales de CO₂ provienen de la fabricación del cemento. Actualmente en el mundo se producen unos 4000 millones de t de hormigón que equivales a la mitad de plástico producido a nivel mundial en los últimos 60 años.

A pesar de estas cuestiones; no me cabe duda que el hormigón es y seguirá siendo un producto vital para el desarrollo humano, sobre todo en regiones y países en vías de desarrollo, como el sudeste asiático y el África subsahariana.

2.4.2.3. Definición de hormigón

El concreto u hormigón es el material resultante de unir áridos con la pasta que se obtiene al añadir agua a un conglomerante. Cuando nos referimos al concreto, generalmente es un cemento artificial y en concreto se trata de cemento Portland [29]. El hormigón es un material de construcción formado básicamente por rocas de un tamaño limitado y que cumplen unas exigencias mecánicas, químicas y granulométricas, las cuales están unidas por una pasta aglomerante formada por un conglomerante (cemento) y agua [21]. También a estos compuestos, durante su mezcla y amasado, pueden añadirse otros compuestos con la intención de mejorar alguna característica determinada.

La pasta formada por el cemento y el agua es la que da al hormigón su fraguado y endurecimiento, mientras que el árido es un material inerte sin participación directa en el fraguado y endurecimiento. El cemento se hidrata en contacto con el agua, dando origen a una serie de reacciones químicas, que lo convierten en una pasta maleable y que en el transcurso de horas deriva en el fraguado y endurecimiento de la mezcla.

El hormigón; una vez que la mezcla de sus componentes ha fraguado y endurecido, se convierte en un compuesto de dureza pétrea, similar a una roca y que puede ser fabricado completamente a pie de obra [21]. Una de las grandes ventajas del hormigón es su facilidad de moldeo, tomando la forma y geometría del molde, envase o encofrado en el que se vierte y alcanzando tras un periodo de tiempo de endurecimiento, una gran resistencia a la deformación.

2.4.2.4. Diferencia entre mortero y hormigón

A pesar de que las dos mezclas contienen como base el cemento que sirve de aglomerante mediante una reacción de hidratación con el agua; existe una diferencia esencial entre mortero y hormigón.

El mortero está compuesto de cemento, agua y arena y el hormigón tiene los mismos componentes más grava. En cierta forma, el hormigón es un mortero al que se le añaden áridos gruesos. En la Figura 2.53 se representa la diferencia entre ambas mezclas.



Fig.2.53 Diferencia entre mortero y hormigón
(<https://jhonrodrigueztec.com/2015/10/semana-11-y-12.html>).

2.4.2.5. Componentes fundamentales del hormigón.

Los componentes fundamentales son el cemento, el agua, los áridos y otros productos como aditivos y adiciones que son incorporados en cantidades inferiores al 1 % respecto a la masa total, con objeto de dotar al hormigón de características especiales (colores, aceleradores y retardadores de fraguado, etc.). En Figura 2.54 se representa un esquema cualitativo de los componentes fundamentales del hormigón y en la Figura 2.55 se representan proporciones cuantitativas básicas de un hormigón.

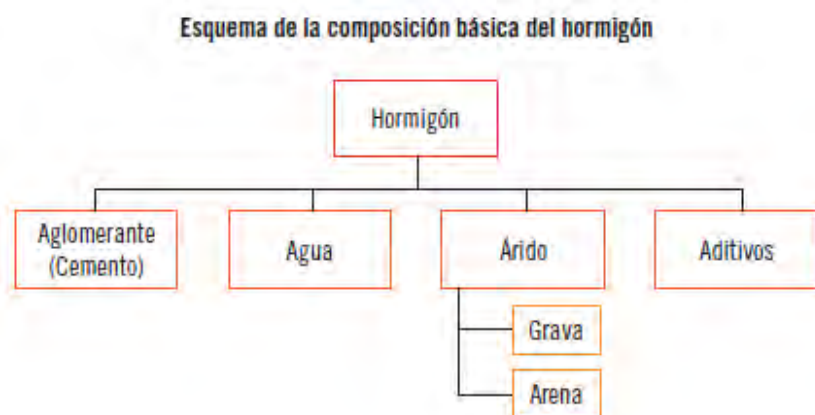


Fig. 2.54 Esquema cualitativo de los componentes de un hormigón (wikipedia.org).

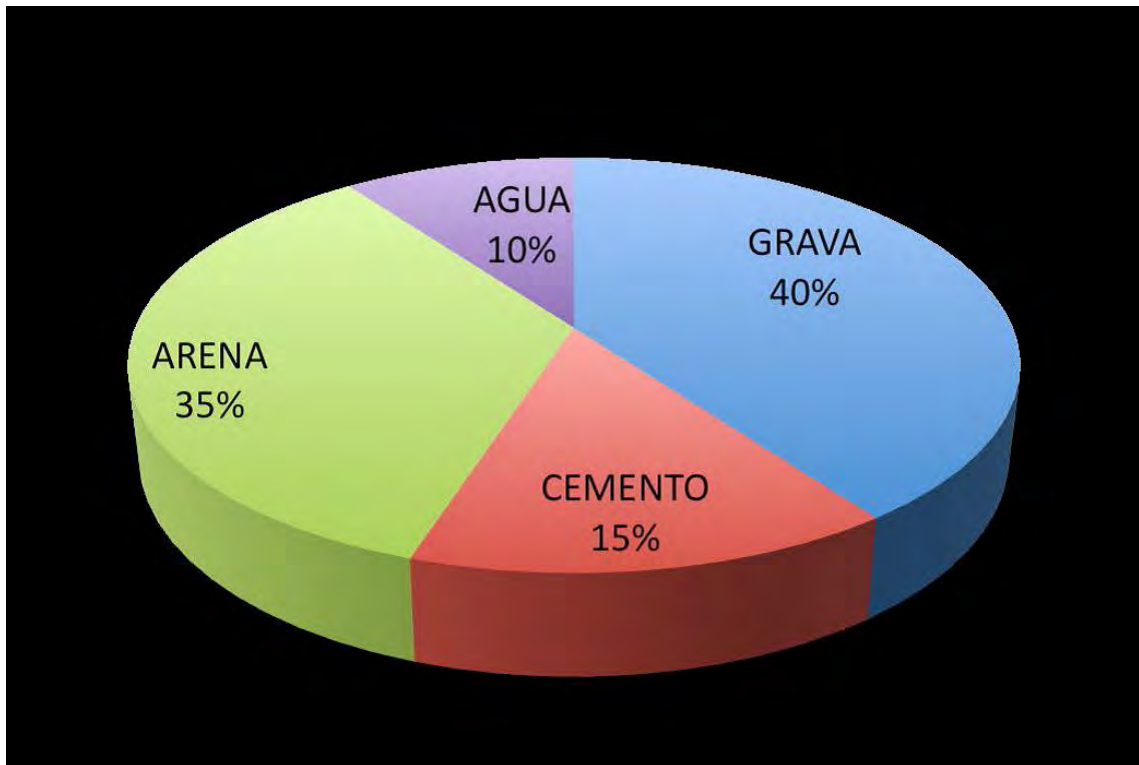


Fig. 2.55 Esquema cuantitativo de componentes de un hormigón (es.slideshare.net).

2.4.2.6. Características fundamentales y comportamientos del hormigón

Antes de ver los comportamientos mecánicos del hormigón, fijémonos en los diferentes tipos de esfuerzos a que está sometido un cuerpo a consecuencia de las fuerzas que actúan sobre él. Estos esfuerzos pueden ser de tracción, compresión, flexión, torsión y cortante; como se representan en la Figura 2.56.

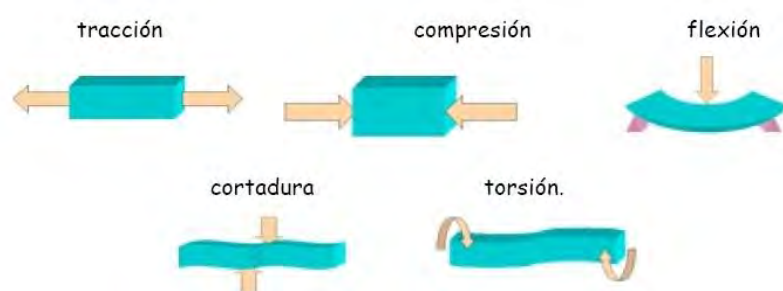


Fig. 2.56 Tipo de esfuerzos de un cuerpo en función de las fuerzas que actúan en él (<https://sites.google.com/site/mecanismoscervantes/home/esfuerzos>).

La principal característica del hormigón es la de resistir muy bien a los esfuerzos de compresión; pero sin embargo su resistencia a esfuerzos de tracción como de efecto cortante son relativamente bajos [21] [29].

Para superar esta deficiencia del hormigón “se arma” el concreto con barras de acero y es el conocido como hormigón armado; el cual permite soportar los esfuerzos de tracción y cortantes con las barras de acero.

La resistencia a compresión para un hormigón ordinario suele ser de 150 – 500 k/cm² o lo que es lo mismo que 15 – 50 MPa. También existen hormigones especiales de alta resistencia a la compresión que pueden alcanzar los 2000 k/cm² o 200 MPa.

La resistencia a tracción es baja proporcionalmente y suele alcanzar 1/10 del valor de la resistencia a compresión. Para determinar estas propiedades mecánicas, se realizan ensayos mecánicos sobre hormigón endurecido que se verán posteriormente.

La densidad varía dependiendo de la cantidad y densidad del agregado, del aire ocluido y de las características del agua y cemento. El concreto convencional (pavimentos, edificios) varía entre 2200 – 2400 kg/m³, siendo la densidad de referencia 2350 kg/m³. Dependiendo de la densidad, los hormigones serán pesados con una densidad de 3200 kg/m³ (aumenta la cantidad de agregados densos), hormigón normal con una densidad de 2350 kg/m³ y ligero con densidades de 1800 kg/m³ [29].

La pasta del hormigón formada con cemento y agua, la cual embebe a los áridos, tiene la facultad de fraguar y endurecer progresivamente tanto en el aire como en el agua. Este proceso de fraguado y endurecimiento es el resultado de reacciones químicas por hidratación del cemento, pasando de estado líquido a sólido con un progresivo desarrollo de las resistencias mecánicas. Actualmente para la fabricación de los hormigones se utilizan cementos comunes CEM I o Portland y como se vio en el punto 2.3.6 (Cementos y adiciones) el fraguado de este cemento comienza al reaccionar el C₃A, posteriormente el C₃S y por último el C₂S por este orden; formando gel de silicato cálcico hidratado CSH.

En condiciones normales, un hormigón Portland, comienza a fraguar a los 45 minutos de haberse quedado en reposo en los encofrados y termina el fraguado a las 10 – 12 horas; estos datos son orientativos ya que pueden variar en función de la temperatura y humedad. Acabado el fraguado, comienza el endurecimiento, el cual tiene un ritmo rápido en los 2 primeros días, adquiriendo casi la mitad de la resistencia mecánica; a los 7 días adquiere casi los $\frac{3}{4}$ de la resistencia y sigue aumentando hasta los 28 días, donde casi tiene la resistencia total, estabilizándose hasta llegar al año.

En figura 2.57 se observa la variación de la resistencia en % del hormigón con el paso de los días

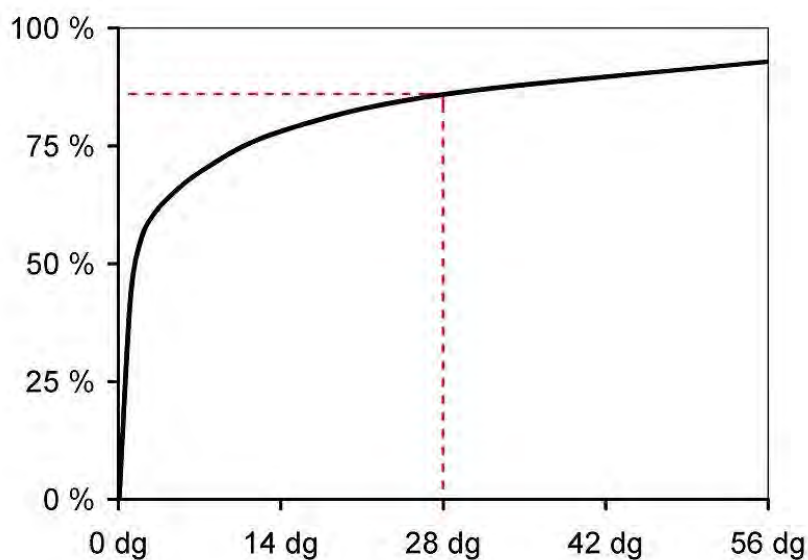


Fig. 2.57 Variación de resistencia en % del concreto a los 14, 28, 42 y 56 días.

En la Tabla 17, se indica como es una evolución orientativa de la resistencia a compresión tomando como unidad la resistencia a la edad de 28 días.

Tabla 17. Evolución de resistencia a compresión de un hormigón Portland normal.

Edad en días.	3	7	28	90	360
Resistencia a compresión	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35

Otro parámetro físico importante es el coeficiente de dilatación térmica que consiste en el cambio de longitud o volumen que se produce cuando un cuerpo sólido o un fluido dentro de un recipiente cambia de temperatura, provocando una dilatación al calentarse o contracción al enfriarse. En el caso del hormigón este coeficiente de dilatación es igual que el del acero, lo cual hace que el hormigón se dilate o contrae con magnitudes iguales al acero, lo cual resulta útil para su uso en las obras de construcción y además el hormigón protege al acero de la oxidación, ya que lo recubre.

Aparte de la resistencia y durabilidad, el hormigón posee otros atributos que le hacen muy apetecible como material de construcción y entre estas cualidades podemos citar las siguientes:

La versatilidad que hace que se pueda utilizar en construcciones tan diferentes como edificios, puentes, presas, alcantarillados, carreteras, pistas de aterrizaje. Tiene poca necesidad de mantenimiento ya que no pierde sus propiedades claves de inerte y compacto en el tiempo.

Es un material asequible económicamente, si lo comparamos con otros materiales como el acero.

La resistencia al fuego es una de sus características intrínsecas y es una de las mejores opciones a la hora de reforzar la protección antiincendios de un edificio. El hormigón tiene carácter aislante, lo cual significa que retiene las temperaturas, necesitando menos calor en invierno y menos refrigeración en verano.

También refleja la luz, con lo cual absorbe poco calor, haciendo el efecto Albedo.

2.4.2.7. Tipos de hormigones

Existen varios tipos de hormigones y para su estudio se clasifican en varios grupos:

- . **Hormigones según su densidad.**
- . **Hormigones según su composición.**
- . **Hormigones según su armado.**
- . **Hormigones especiales.**

Hormigones según su densidad. Pueden ser de 3 clases diferentes [21].

Hormigones normales: densidad comprendida entre 2000 – 2800 kg/m³.

Hormigones ligeros: densidad comprendida entre 1000 – 2000 kg/m³.

Hormigones pesados: densidad superior a 2800 kg/m³.

Los hormigones ligeros son interesantes cuando por necesidades estructurales, es importante reducir peso. Se utilizan en elementos constructivos que no precisan grandes resistencias como tabiques, forjados en pisos y sobre todo como aislantes de calor y sonido. Para su obtención es necesario; emplear áridos de baja densidad o eliminar los elementos finos o arena del hormigón tradicional o incorporar burbujas de gas en la masa del hormigón.

En Figura 2.58, se representa muestra de hormigón ligero.



Fig.2.58 Hormigón ligero (Fuente: tectónica. archí).

Los hormigones de alta densidad se fabrican con áridos de densidades superiores a las normales, empleando como árido barita, magnetita y se emplean para blindar estructuras y proteger frente a la radiación.

Hormigones según su composición. Se pueden distinguir las siguientes clases:

Ordinario. Es el material obtenido mezclando cemento Portland, agua y áridos de varios tamaños, superiores e inferiores a 5 mm; grava y arena [29].

Hormigón ciclópeo. Es el que tiene embebidos en su interior piedras de dimensiones superiores a 30 cm [21]. Se puede decir que es la unión de un hormigón ordinario con rocas grandes. Se utiliza en construcciones de presas, muros de contención. El porcentaje de concreto/ piedra es de 60/40 y las piedras deben estar limpias y sin fracturas [29]. Figura 2.59

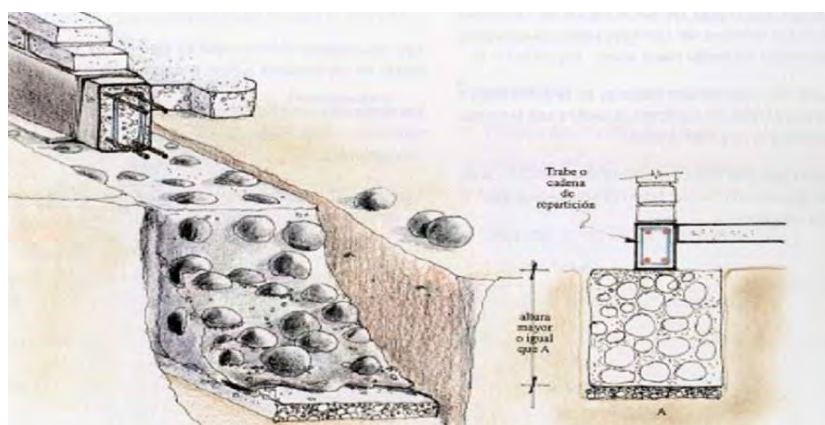


Fig.2.59. Hormigón ciclópeo (www.elconstructorcivil.com).

Hormigón inyectado. Es el resultado de inyectar un mortero en el interior de un encofrado en el cual se ha colocado previamente el árido grueso.

Hormigón sin finos. Es el solo tiene árido grueso; árido superior a 5 mm.

Hormigón aireado. Se obtiene incorporando a la mezcla aire u otros gases derivados de reacciones químicas, resultando un hormigón ligero o de baja densidad [29].

Hormigón refractario. Es una mezcla de cemento aluminoso, agua y materiales refractarios. Entre estos materiales se encuentra la mullita, corindón, alúmina y la bauxita. Este tipo de hormigón tiene la facultad de resistir altas temperaturas y sus principales usos son en la construcción de hornos industriales, hornos de cocinas y de restaurantes. Figura 2.60.



Fig. 2.60 Hormigón refractario. (Civil Knowledges).

Hormigones según su armado

Hormigón en masa. Es aquel que se emplea sin ningún tipo de armadura en su interior. Este tipo de hormigón es apto para resistir esfuerzos de compresión. Se utiliza en la construcción de estructuras donde los esfuerzos son casi totalmente de compresión, como presas, cimentaciones, muros. Se vierte en moldes previamente preparados [29].

Hormigón armado. Es el hormigón que en su interior tiene armaduras de acero para resistir esfuerzos de compresión y tracción, soportando los de compresión el hormigón y los de tracción las armaduras [29]. Para su trabajo se debe disponer de un molde o encofrado donde depositamos la armadura de hierro y sobre esta se vierte el hormigón fresco de modo que envuelva y recubra la armadura.

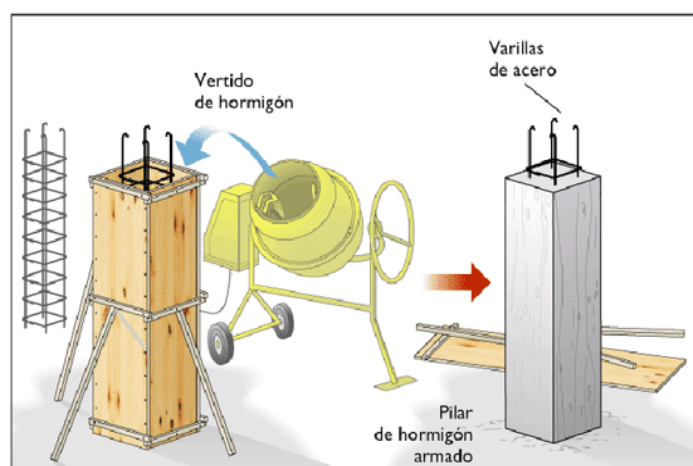


Fig. 2.61 Hormigón armado
(site.google.com).

Cuando el hormigón ha fraguado, se retira el encofrado, dejando el elemento constructivo que queríamos obtener. Este hormigón es el más usado en multitud de

construcciones; cimentaciones, zanjas, pilares, vigas, viguetas, etc. En Figura 2.61 se representa una estructura de hormigón armado.

Hormigón pretensado. Es aquel en el cual el acero esta traccionado incluso sin que la estructura este cargada, recibiendo la armadura el nombre de armadura activa [28]. Esta armadura será de acero de alta resistencia y formada por alambres o cordones de acero. En realidad, es una variedad del hormigón armado, cuyas varillas han sido tensadas antes de que fragüe el hormigón. Una de las grandes aplicaciones de este tipo de hormigón es la construcción de puentes; en Figura 2.62 se muestra una imagen de hormigón pretensado.



Fig. 2.62 Hormigón pretensado

(<http://grupounorephormigon.blogspot.com/2014/09/hormigon-pretensado.html>).

Hormigón postensado. Es el hormigón que tiene en su interior una armadura de acero especial sometida a fricción, siendo el tensado de la armadura, posterior al fraguado y endurecimiento del hormigón. Una vez que los cables de la armadura son tensados, estos son anclados a la estructura por piezas especiales [21]. Ver Figura 2.63.



Fig. 2.63 Hormigón postensado (<https://www.cuevadelcivil.com/2016/01/hormigon-pretensado-apuntes.html>).

Hormigón sumergido. Es el que se coloca en fresco debajo del agua [21].

Hormigón vibrado. Se consolida por vibración para aumentar su compacidad [21].

Hormigón bombeado. Es transportado de forma continua al ser impulsado a través de una tubería [21].

Hormigón centrifugado. Es el que una vez que se ha moldeado, se somete a centrifugación para su compactación [21].

Hormigón proyectado. El hormigón fresco es conducido por un tubo, provisto de una boquilla, por la que sale el hormigón lanzado a gran velocidad [21].

Hormigones especiales

Hormigón reforzado con fibras. Es aquel que incorpora fibras cortas que, amasadas juntamente con los componentes del hormigón, se dispersan uniformemente en su masa, siendo el objetivo de dicho refuerzo, reducir algunos de los inconvenientes de los hormigones tradicionales [21].

La matriz del hormigón proporciona la resistencia a compresión y rigidez, mientras que las fibras soportan los esfuerzos a tracción y mejoran la tenacidad [29].

Las fibras empleadas pueden ser de tres tipos: minerales (vidrio); orgánicas (polipropileno) y metálicas (acero). Ver Figura 2.64.



Fig. 2.64 Hormigón reforzado con fibras metálicas. (<http://fernando-teg-obrasciviles.blogspot.com/p/concretos.html>).

Hormigones de alta resistencia. Son aquellos que presentan unas características de resistencia muy superiores a la de los hormigones convencionales; fruto de una cuidada selección y dosificación de sus componentes [21].

El hormigón convencional puede tener una resistencia a compresión de 50 MPa como máximo; en ocasiones estas resistencias habituales no son suficientes para soportar las cargas a que serán sometidos los hormigones; por ejemplo, su propio peso.

El hormigón de alta resistencia aparece como solución a este problema; denominándose de alta resistencia cuando supera los 50 MPa a los 28 días; de muy alta resistencia si supera los 90 MPa y súper-hormigones los que superan 125 MPa.

Para conseguir estas elevadas resistencias son necesarios una cuidada selección de los componentes; tanto en cementos como en áridos y aditivos superplastificantes, en proporción máxima de estos aditivos del 1 % con relación al peso del cemento.

En Figura 2.65 se muestra un ejemplo de una infraestructura con este tipo de hormigones.



Fig. 2.65 Hormigones de alta resistencia.

(<https://masqueingenieria.com/blog/hormigones-especiales-hormigon-de-alta-resistencia/>).

Hormigones autocompactantes. Es el hormigón que, sin necesidad de vibración, ni otro tipo de compactación externa, es capaz de rellenar todos los rincones del encofrado, a través de la armadura, sin producir segregación del árido grueso [21].

Esto es como consecuencia de una dosificación específica y del empleo de aditivos super plastificantes; dando como resultado un hormigón muy fluido que tiene la característica de rellenar por su propio peso los encofrados y compactarse sin aplicar otros medios externos [30] .

Son múltiples las ventajas que ofrece este tipo de hormigón ya que no requiere de los métodos tradicionales de compactación para su consolidación; menor número de operarios, menos costes energéticos, menor contaminación acústica debido al ruido de las máquinas utilizadas y reducción de plazos de ejecución [30].

En estado fresco el autocompactante tiene además otras ventajas; mejor encapsulado de armaduras, facilidad de colocación por gravedad o bombeo y gran capacidad de relleno de moldes complejos. En estado endurecido, presenta mejores propiedades mecánicas, de durabilidad y de acabado superficial.

En general, el autocompactante se diferencia del hormigón convencional por tener menos contenido de árido grueso y menor tamaño de árido, mayor volumen de partículas finas de tamaño menor de 125 μm y el empleo de aditivos super plastificantes y/o cohesionantes.

En Figura 2.66 se observa la diferencia entre un hormigón convencional y un hormigón autocompactante, en cuanto a la dosificación de los componentes en volumen.

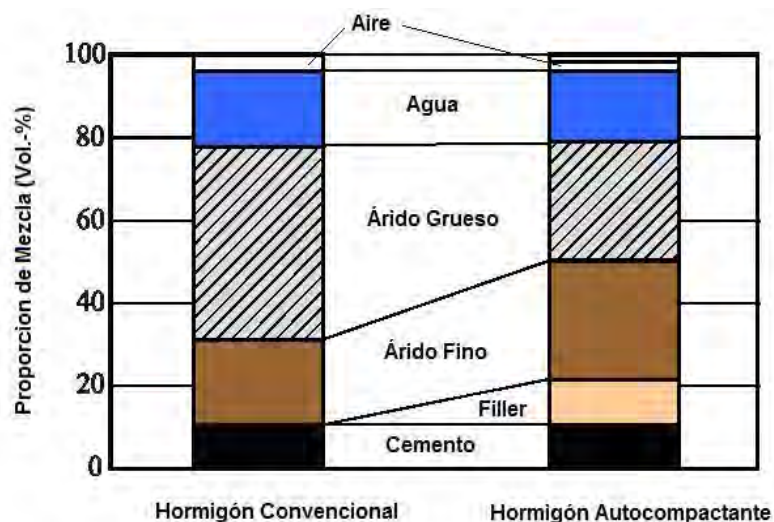


Fig.2.66 Diferencia entre hormigón normal y autocompactante.

(<https://masqueingenieria.com/blog/hormigones-especiales-hormigon-autocompactante/>).

Como se ve en Figura 2.60, aparece un nuevo árido fino, llamado filler mineral, adición inerte, normalmente calizo, con tamaños de partículas comprendidas entre 80 y 125 μm , que se añaden a la dosificación y que hacen que el hormigón autocompactante en estado fresco aumente el volumen de la mezcla, disminuye la interacción intergranular y en estado endurecido mejora el acabado superficial, reduce la capilaridad e incrementan las propiedades mecánicas. También otros factores como la finura y composición química del filler, influyen en la demanda de agua y de aditivos en las mezclas [30].

Los hormigones autocompactantes, pueden ser el futuro, pero de momento tienen un freno a su uso masivo y es el coste, debido principalmente a la escasez de filler y consecuencia de ello su alto coste.

Hasta ahora en este punto se han visto los diferentes tipos de hormigones; pero al igual que los cementos y los morteros, los hormigones tienen su propia nomenclatura y brevemente la repasaremos. Esta nomenclatura se rige por la EHE (Instrucción Española del Hormigón Convencional) según la cual los hormigones están tipificados y es obligatorio referirse a ellos con estas tipificaciones en planos, proyectos, fabricación y puesta en obra [29].

Hormigón T – R/C/TM/A

T: se denominará HM cuando sea un hormigón en masa. HA hormigón armado.

R: resistencia característica del hormigón expresada en N/mm^2 .

C: inicial de la consistencia S = seca. P plástica. B blanda. F fluida. L líquida.

TM: tamaño máximo del árido expresado en mm.

A: designación del ambiente a que será expuesto el hormigón.

2.4.2.8. Características de los componentes del hormigón

Los componentes básicos del hormigón son: cemento, agua, áridos y otros componentes minoritarios que se pueden incorporar como adiciones y aditivos.

Cemento. Los cementos son productos que, amasados con agua, fraguan y endurecen, formándose nuevos productos resultantes de reacciones de hidratación, estables tanto al aire como sumergido en el agua. En la fabricación de hormigones se pueden utilizar cementos comunes, casi siempre CEM I (Portland); siendo las cantidades mínimas de cemento de 200 – 250 – 275 kg/m³ según sean hormigones en masa HM, hormigón armado HA u hormigón pretensado HP [21].

La resistencia a compresión a 28 días de los cementos empleados es de 32,5 – 42,5 y 52,5 seguidas de las letras R y N, según sean de alta resistencia inicial o normal resistencia inicial. Se consideran cementos de endurecimiento lento, los de la clase resistente 32,5 N; de endurecimiento normal los de la clase 32,5 R y 42,5 N y de endurecimiento rápido los de las clases 42,5 R, 52,5 N y 52,5 R [21].

El cemento no debe llegar a las obras e instalaciones excesivamente caliente; si su manipulación se realiza por medios mecánicos la temperatura no excederá de 70°C y si se va a realizar su manipulación a mano no debe exceder de los 40°C. También es importante el almacenamiento máximo que será de tres meses, dos meses o de un mes para las clases resistentes 32,5, 42,5 y 52,5 respectivamente.

Agua. El agua de amasado no debe contener ningún compuesto dañino en cantidades tales que afecten tanto a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión. Como norma general podrán utilizarse todas las aguas aceptables para el consumo humano [21].

También se podrán emplear aguas salinas o de mar en el amasado de hormigones sin armaduras; pero no en el hormigón armado o pretensado.

Áridos. Son materiales granulares inertes, de tamaño comprendido entre 0 y 100 mm, de naturaleza inorgánica y de procedencia natural o artificial que contribuyen a la estabilidad del volumen, resistencias y economía de los morteros y hormigones. En Figura 2.67 se representa esquemáticamente las distintas procedencias de los áridos.

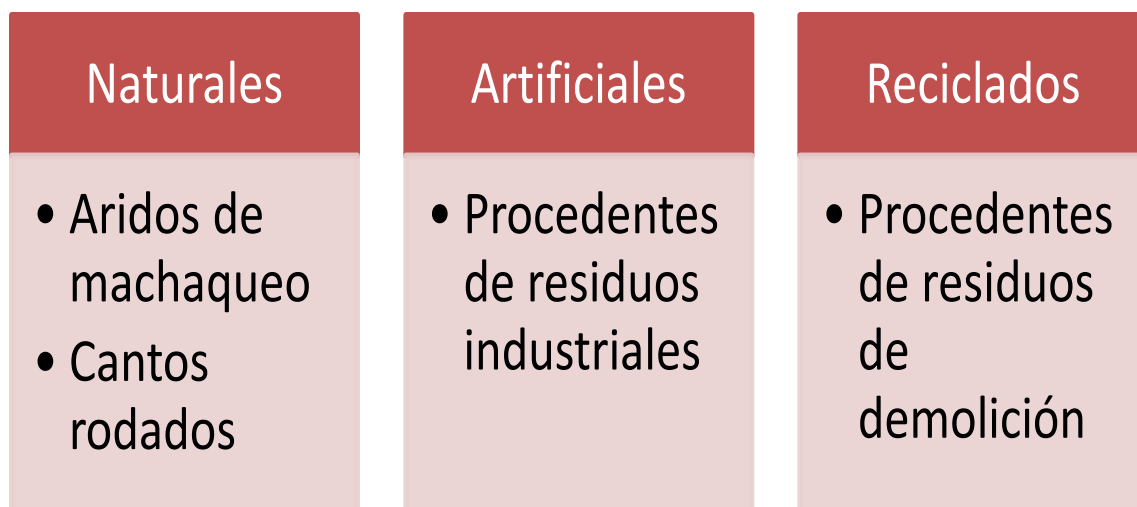


Fig.2.67 Procedencias de los áridos.

Áridos naturales. Proceden directamente de la naturaleza su explotación se hace en canteras y graveras [21]. Estos áridos naturales a su vez según su proceso de formación se clasifican en:

Áridos de machaqueo, se producen en canteras por procesos de triturado y molienda en el que el árido presenta formas angulosas.

Cantos rodados, tienen forma redondeada, debido a procesos erosivos ya que son fragmentos de rocosos pulidos de forma natural.

En Figura 2.68 se representa una cantera y los áridos de machaqueo y cantos rodados.



Fig. 2.68 Cantera de Hormisa, áridos de machaqueo y de cantos rodados.

. **Áridos artificiales.** Obtenidos mediante un proceso industrial a partir de materiales inorgánicos u orgánicos [21]. Básicamente están constituidos por subproductos o residuos de procesos industriales como las escorias de alto horno, cenizas volantes de la combustión del carbón, etc. En Figura 2.69 se representa un árido artificial procedente de la siderurgia.



Fig. 2.69 Áridos artificiales (Grupo Etxeberria).

. **Áridos reciclados.** Resultan del tratamiento de material inorgánico que previamente se ha utilizado en la construcción de edificaciones y/o estructuras [21]. Ver figura 2.70



Fig.2.70 Residuos de construcción y demolición. (Transanc).

En cuanto a su granulometría, los áridos pueden ser:

. Áridos finos, son los áridos o fracción del mismo que pasa por un tamiz de 4 mm de malla (tamiz 4 UNE- EN933-2) [21].

. Áridos gruesos o grava, son los áridos o fracciones del mismo que resulta retenido por un tamiz de 4 mm de luz de malla (tamiz 4 UNE – EN 933-2) [21].

Para determinar las características de los áridos existen una serie de ensayos: forma de partículas, resistencia mecánica, reactividad, granulometría, etc. Todos estos ensayos están totalmente normalizados.

. **Adiciones.** Productos que se añaden al hormigón para darle características especiales que repercuten principalmente en su resistencia [21]. La Instrucción EHE recoge, solamente, la utilización de cenizas volantes y humo de sílice; como adiciones al hormigón en el momento de su fabricación. Esta Instrucción nos indica las siguientes cuestiones:

. El cemento que emplear será siempre del tipo CEM I.

. En hormigón pretensado, el porcentaje máximo de sustitución será del 20% si usamos cenizas volantes y del 10% si utilizamos humo de sílice [21].

. En estructuras de edificación; la cantidad máxima de cenizas volantes adicionadas no excederá el 35% del peso del cemento y el humo de sílice no sobrepasará el 10% del peso del cemento [21].

Aditivos. Productos que, incorporados al hormigón, antes o después del amasado, en cantidades no superiores al 5 % del peso del cemento, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguno de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento [21].

Estos aditivos pueden ser: plastificantes, superplastificantes, aceleradores o retardadores de fraguado, etc. Su dosificación se debe hacer en el % indicado por el fabricante; siempre en % de la masa del cemento.

2.4.2.9. Fabricación, transporte y puesta en obra del hormigón

La fabricación del hormigón fresco requiere un almacenamiento de materias primas, equipos dosificadores de estas materias primas y equipo de amasado [28].

Una vez dosificada la mezcla; se procede al amasado, operación que tiene la finalidad de recubrir los áridos de una capa de pasta de cemento y mezclar todos los componentes para conseguir una masa uniforme; esta operación se realiza en equipos llamados amasadoras u hormigoneras [28].

El transporte se puede realizar por distintos medios, dependiendo de la distancia entre el punto de amasado y la obra; pero se deben tener en cuenta algunas cuestiones:

- . Que no se produzca una desecación de la masa en el transporte.
- . Que el tiempo transcurrido entre la adición del agua de amasado al cemento y a los áridos y la colocación en obra, no será superior a hora y media [28].
- . La temperatura del hormigón fresco no debe superar los 30°C ni ser inferior a 5°C durante el tiempo transcurrido entre el amasado y la colocación en obra [28].
- . Los equipos de transporte no tendrán residuos de hormigón endurecido, para lo cual se limpiarán antes de proceder a la carga de una nueva masa de hormigón fresco [28].

El transporte se podrá realizar en: carretilla, camiones, vagonetas, hormigoneras, etc.

Durante la puesta en obra, también se deben tener en cuenta algunas precauciones:

- . Evitar la caída libre del hormigón fresco desde una altura superior a 2 m para impedir que se rompa la homogeneidad de la mezcla ya que cae más rápidamente el árido grueso que el resto de los componentes [28].
- . Antes de verter el hormigón en los moldes, asegurarse de la no existencia de elementos extraños para no crear discontinuidades [28].
- . La dirección del vertido será vertical, trasladando el medio de vertido y evitando el desplazamiento horizontal de la masa [28].
- . Evitar el vertido con pala, extendido con rastrillo para no producir segregaciones [28].

Una vez vertido el hormigón fresco en los encofrados, aparecen coqueas y elevada porosidad; las cuales se eliminan mediante el proceso de compactación, el cual puede hacerse por apisonado, centrifugado o vibración, entre otros sistemas [28].

2.4.2.10. Ensayos exigibles a un hormigón fresco y endurecido

2.4.2.10.1. Ensayos hormigón fresco

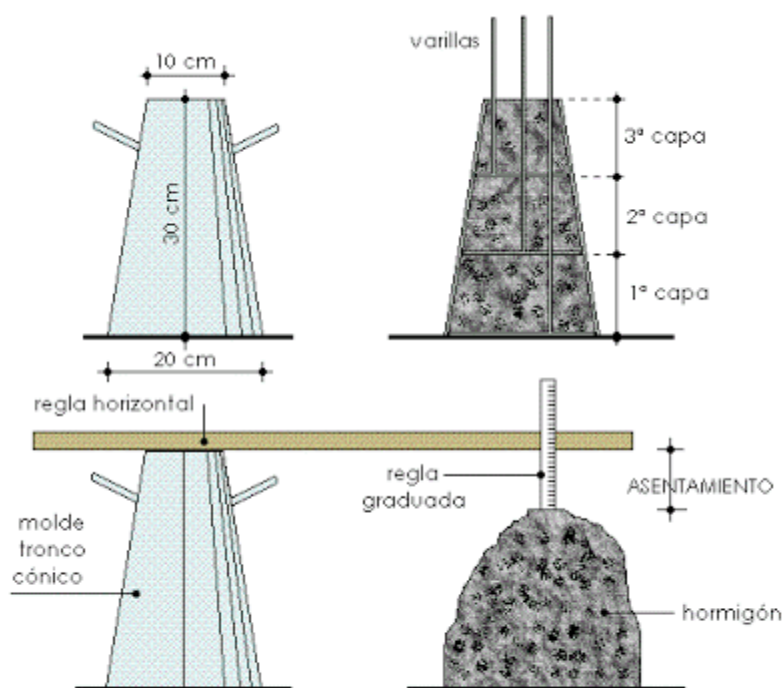
Hormigón fresco es el que tiene plasticidad y por tanto tiene la facultad de endurecerse. El hormigón fresco manifiesta estas condiciones hasta que se inicie el fraguado del cemento que contiene, siendo este periodo variable y dependiendo del tipo de cemento empleado, cantidad de agua, utilización de aditivos, etc.

Al hormigón fresco se le realizan una serie de ensayos de comprobación de sus características de calidad, se citan algunas de ellas.

Consistencia: es la capacidad que presenta el hormigón en estado fresco para deformarse y moldearse. Hay varios métodos de ensayo y me voy a referir solo a dos de ellos: cono de Abrams y mesa de sacudidas.

Método de cono de Abrams. Este cono es un molde metálico de forma troncocónica de 30cm de altura y de 10 y 20 cm de diámetro superior e inferior; Figura 2.71; siendo el método operatorio el siguiente:

- a) Se recoge la muestra de hormigón y se homogeniza de nuevo.
- b) Se llena el cono en tres capas, de igual altura, apisonando cada una de ellas con 25 golpes de varilla, cuidando que no penetre en la capa anterior.



ENSAYO DEL CONO DE ABRAMS

Fig. 2.71 Cono de Abrams y método de ensayo (ingenieriaymas.com).

- c) Lleno el cono, se enrasa la parte superior y se retira el hormigón derramado en la plancha de la base. Se levanta el molde troncocónico verticalmente y se coloca al lado del hormigón moldeado.
- d) Se mide la diferencia de altura entre el cono y el hormigón fresco, colocando la varilla horizontalmente sobre el cono. Según las dimensiones de este asiento, la consistencia será diferente Tabla 18.

Tabla 18. Valoración de los resultados de consistencia según EHE-08.

Consistencia	Asiento en cm
Seca	0 – 2
Plástica	3 – 5
Blanda	6 -9
Fluida	10 – 15
Líquida	≥ 16

. **Mesa de sacudidas.** Este ensayo de la consistencia, se fundamenta en medir el escurrimiento o aumento de diámetro que experimenta la base inferior de un tronco de cono de hormigón fresco moldeado en un molde de 13 cm de altura y 17 y 25 cm de diámetro superior e inferior, situado sobre una mesa circular al someterla a 15 sacudidas de 12 mm de alto durante 15 segundos [28].



Fig. 2.72 Mesa de sacudidas (construmatica.com).

Para el cálculo, se mide con un metro, la dimensión máxima del hormigón esparcido en las dos direcciones paralelas a los bordes a los bordes de la masa, calculando la media aritmética de los dos diámetros. En Figura 2.72 se representa mesa de sacudidas y en Tabla 19, se especifican las diferentes consistencias en función del diámetro esparcido.

Tabla 19. Consistencia según mesa de sacudidas

Consistencia	Diámetro base mm
Seca	0 a 30
Plástica	30 a 50
Blanda	50 a 70
Fluida	70 a 100
Líquida	>100

Homogeneidad: es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen perfectamente mezclados en toda la masa y en la proporción prevista al diseñar la mezcla [28].

La homogeneidad puede perderse por segregación y por exudación.

Segregación: consiste en la separación de los componentes del hormigón y su decantación de acuerdo con su tamaño y densidad [28].

Exudación: consiste en una forma de segregación que se produce por el ascenso del agua de amasado hacia la superficie; debido a la incapacidad de los áridos de arrastrarla con ellos al irse compactando. Debido a este fenómeno, se crea en la superficie del hormigón fraguado una capa delgada, débil y porosa que no tiene resistencia ni es durable [28].

2.4.2.10.2. Ensayos hormigón endurecido.

. **Densidad:** es la relación entre la masa del hormigón y el volumen que ocupa, oscilando dicho parámetro en función de los áridos utilizados; con áridos normales la densidad oscila entre 2,3 y 2,5 kg/dm³, con áridos pesados entre 3 y 3,5 kg/dm³ y con áridos ligeros su densidad oscila de 0,6 a 1,3 kg/dm³ [28].

. **Elasticidad:** viene representada por el módulo de elasticidad, el cual representa la rigidez de este material ante una carga impuesta sobre sí mismo. Para los hormigones endurecidos (edad > 28 días) los valores del módulo de elasticidad oscilan entre los 15.000 y los 45.000 MPa [28].

. **Permeabilidad:** se puede entender por permeabilidad el grado de dificultad que ofrece el hormigón a que los fluidos (líquidos o gaseosos) penetren en su interior. El ensayo de impermeabilidad se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-8:2020; con el ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión en hormigón endurecido. Se considera que un hormigón es suficientemente permeable, cuando la profundidad de penetración máxima en la probeta es igual o superior a 50 mm y la profundidad de penetración media es igual o menor de 30 mm [28]. Figura 2.73



Fig. 2.73 Ensayo de permeabilidad y probetas ensayadas (Thomas, C., 2012).

. **Resistencia a compresión:** se obtiene a partir de los resultados de la rotura a compresión, en número de probetas igual o superior a dos, realizadas sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, de 28 días de edad; fabricadas,

conservadas, refrentadas y rotas por compresión según el método de ensayos descrito en las normas UNE-EN 12390-2 y UNE-EN 12390-3 [28]. En Figura 2.74 se representan los pasos para hacer el ensayo de compresión.



Fig. 2.74 Ensayo de resistencia a compresión (www.ibertest.es).

Resistencia a tracción: en el hormigón este parámetro es bajo; la décima parte de su resistencia a compresión y esta debilidad es la causa de fisuración del hormigón; existiendo varios procedimientos para su determinación [28].

2.5 Hormigones de protección neutrónica

La Química Nuclear es extraordinariamente energética ya que se trata de reacciones en los núcleos de los átomos con la consiguiente transformación de masa en energía. En general se puede afirmar que las propiedades físicas del átomo están en el núcleo y las químicas están en la corteza del átomo y se deben a los electrones.

2.5.1 Introducción a las radiaciones

Se puede decir que la radioactividad es un fenómeno que se produce de forma espontánea en núcleos de átomos inestables; emitiendo mediante su desintegración en otro estable, gran cantidad de energía en forma de radiaciones ionizantes.

El primer científico que trabajó en este campo fue el francés Henri Becquerel, el cual, trabajando en su laboratorio de la Sorbona de París sobre la fosforescencia con sales de uranio, descubrió por casualidad que impresionaban estas sales las placas fotográficas a pesar de no estar en contacto con la luz solar. Becquerel concluyó que este fenómeno es consecuencia que las sales de uranio emitían unas radiaciones invisibles que eran capaces de impresionar las placas fotográficas [31].

Más tarde; Maria Sklodowska (Madame Curie) estudiando una muestra de pechblenda (mineral que contiene U, Pb, Ca, Mg) observó que el mineral emitía una radiación muy superior a la que le correspondía al uranio y ello la llevó al descubrimiento primero del polonio y después del radio. Esta propiedad del uranio de emitir radiaciones y transformarse en otros átomos más estables se la llamó radioactividad, la cual es una radioactividad natural de algunos átomos.



Fig. 2.75. Marie e Irene Curie (es.pinterest.com).

Posteriormente en 1934, Frederic Joliot e Irene Curie, descubrieron la radiactividad artificial al bombardear átomos de aluminio, boro y magnesio con partículas alfa, produciendo isótopos radiactivos a partir de elementos no radiactivos [31].

Irene Curie recibió el Premio Nobel de Química en 1935 y su madre Maria Curie recibió los Nobel de Física y Química en 1903 y 1911. Respectivamente. En Figura 2.75 se muestran a ambas científicas.

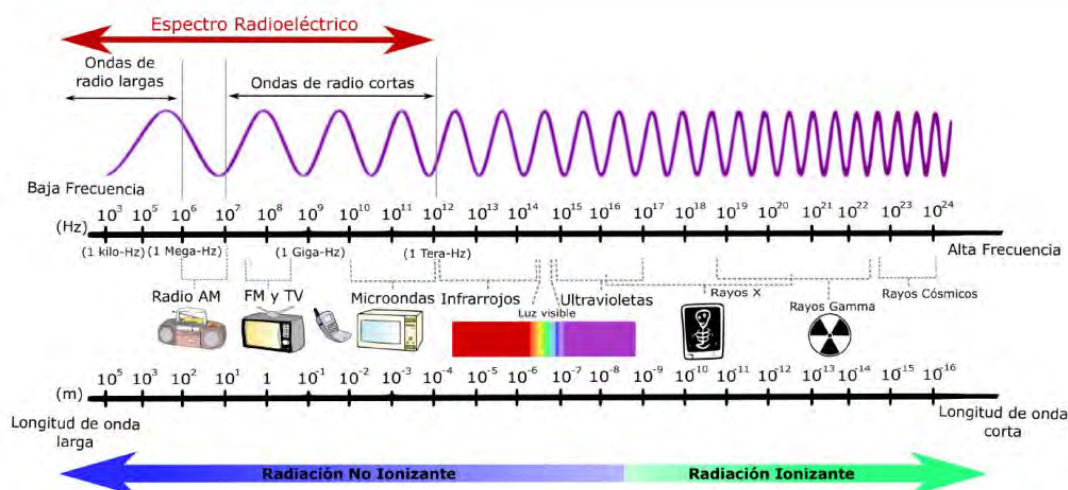
Como se ha visto al hablar de radioactividad, se emiten radiaciones por algunos átomos, pero no todas son nocivas para el ser humano ya que nosotros recibimos radiaciones del Sol, de materiales radiactivos que existen en la Tierra, etc.

La radiación se puede definir como la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier forma de onda electromagnética o partícula.

2.5.2 Tipos de radiaciones

Según su naturaleza se clasifican en electromagnéticas y corpusculares [31]. Las radiaciones electromagnéticas tienen una propagación ondulatoria, todas tienen la misma velocidad en el espacio (300.000 Km/s) y se diferencian por su longitud de onda y frecuencia de que depende su energía. Estas radiaciones electromagnéticas pueden ser a su vez ionizantes (Rayos gamma y Rayos X) y no ionizantes (Radiaciones UV, Radiación Visible, Infrarrojos y Radiofrecuencias) Figura 2.76

Fig. 2.76 Espectro electromagnético (ondas guiadas.blogger).



En Figura 2.76 se puede observar que las radiaciones más energéticas son las ionizantes debido a su alta frecuencia y corta longitud de onda.

Las radiaciones corpusculares se deben a la propagación de partículas subatómicas (núcleos de Helio, protones, neutrones, etc.) pero de velocidad menor que las electromagnéticas.

La ionización es un proceso por el cual se arranca un electrón de un átomo, quedando el átomo eléctricamente descompensado siendo superior el número de cargas positivas al de negativas y formando un átomo ionizado o también llamado ión positivo [31]. Las radiaciones ionizantes poseen mucha energía y realizan el proceso de ionización y sin embargo las radiaciones no ionizantes tienen menos energía y no son capaces de ionizar los átomos.

2.5.3 Características de las radiaciones

Los átomos están compuestos en su núcleo de protones (carga positiva), neutrones (carga neutra) y en su corteza de electrones (carga negativa). En condiciones estables un átomo tiene el mismo número de protones que de electrones por lo cual es neutro eléctricamente; ahora cuando un átomo capta o pierde electrones se convierte en un ión. Figura 2.77

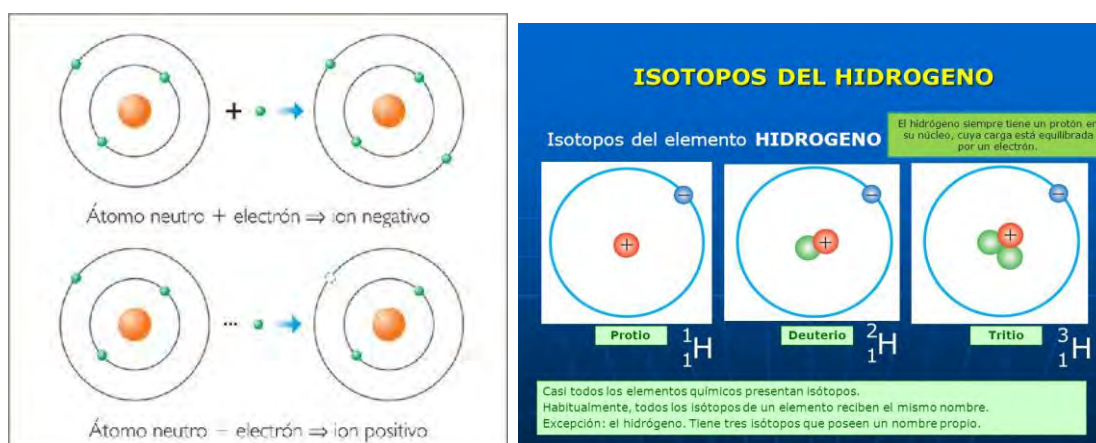


Fig. 2.77 Iones e Isótopos
(unprofesor.com).

Cada elemento tiene un número fijo de protones, pero si este número de protones varía, también varía su masa atómica, existiendo de un mismo elemento varios átomos denominados isótopos. Figura 2.77

Algunos isótopos no son estables; es decir no coincide el número de protones y el de neutrones y tratan de obtener configuraciones más estables liberando energía en forma de radiación ionizante, dando lugar a las series radiactivas que se rigen por las Leyes de Soddy y Fajans. Estas radiaciones ionizantes emitidas son de distinta naturaleza y características Figura 2.78

. Radiaciones alfa o partículas alfa (α): están formadas por 2 protones y 2 neutrones, son núcleos de átomos de helio. La emisión de radiactividad tipo alfa ocurre en general en átomos muy pesados como el uranio, torio o radio. El núcleo de estos átomos es más rico en neutrones que en protones y esto les hace inestables. Las partículas alfa son muy pesadas y llevan mucha energía, lo cual hace que al interactuar con cualquier otra

partícula que encuentre en el camino, incluso con los átomos que forman el aire, causan un gran número de ionizaciones. Las partículas alfa tienen un poder de ionización, pero escasa penetración y son retenidas por una hoja de papel o una lámina de aluminio de 0,1 mm de espesor. No son perjudiciales externamente, aunque sí lo son por inhalación o ingestión [31].

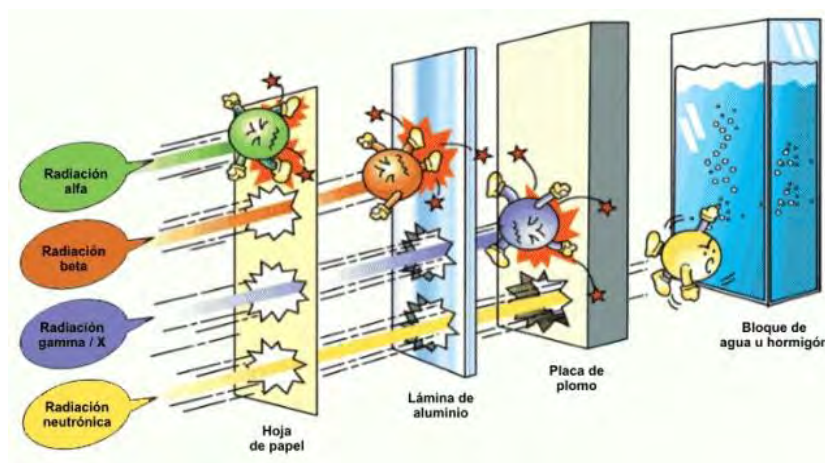


Fig. 2.78 Radiaciones ionizantes (ucc.edu.co).

. **Radiación beta o partículas beta (β)**: consiste en la emisión de electrones por un núcleo atómico procedentes de la descomposición de 1 neutrón (neutrón= 1 protón + 1 electrón +1 neutrino). Esta radiación tiene lugar sobre todo en isótopos ricos en neutrones y suelen ser elementos producidos en reacciones nucleares naturales y más a menudo en plantas de energía nuclear.

Menos poder de ionización que las partículas alfa pero mayor poder de penetración y pueden ser frenadas por una placa de aluminio de 5mm de espesor o una lámina de plomo de 1 mm. Es perjudicial tanto la radiación sea externa o interna [31]

. **Radiación gamma (γ)**: esta radiación es un flujo de ondas electromagnética de alta frecuencia y suelen tener su origen en átomos con núcleos excitados, los cuales al emitir una partícula α o β , poseen todavía un exceso de energía que eliminan en forma de ondas electromagnéticas de muy alta frecuencia y baja longitud de onda. Al ser electromagnética, esta radiación no tiene ni masa ni carga, pero debido a su baja longitud de onda tienen un gran poder de penetración y menos capacidad de ionización que las partículas α y β . Estas radiaciones y son capaces de atravesar cientos de metros de aire, el cuerpo humano y las materias de poca densidad. Son retenidas por capas de hormigón, de plomo de 12 mm o agua. Pueden originar daños en la piel y en tejidos más profundos [31]

. **Radiación X**: al igual que la radiación γ son de origen extra-nuclear y fueron descubiertas por Roëntgen en 1895, siendo el primer ejemplo conocido de radiación ionizante de naturaleza electromagnética. Los Rayos X se producen por el choque de

electrones acelerados a gran velocidad contra la materia. Son radiaciones de longitud de onda corta, se propagan en línea recta y a la velocidad de la luz. Tienen gran poder de penetración aunque menos que la radiación γ , se utilizan para obtener imágenes en radiodiagnóstico [31]

Radiación por neutrones: aparecen generalmente en las desintegraciones radiactivas naturales o artificiales en los reactores nucleares. Son partículas con una masa 4 veces inferior a las partículas α y sin carga por lo que tienen una gran energía y son muy penetrantes al no sufrir interacciones con la materia que van atravesando; solo pueden ser detenidas por gruesos muros de hormigón, plomo o agua [31].

2.5.4 Formas de protección radiológica

La protección radiológica depende de tres factores para proteger a los seres humanos de las fuentes de radiación:

- . **Distancia:** la cantidad de exposición a la radiación depende de la distancia desde la fuente de radiación [32].

- . **Tiempo:** la cantidad de exposición a la radiación depende del tiempo que las personas pasan cerca de la fuente de radiación. La dosis de radiación puede reducirse limitando el tiempo de exposición [32].

- . **Blindaje:** si la fuente de radiación es muy intensa y el tiempo o la distancia no proporcionan suficiente protección contra la radiación, se debe usar el blindaje. Este blindaje consiste en barreras de plomo, hormigón o agua [32].

Los hormigones empleados para protección radiológica se usan en centrales nucleares, centros de investigación nuclear, instalaciones sanitarias de radiología, transporte y almacenamiento de residuos radiactivos. Esta protección radiológica se realiza principalmente frente a las radiaciones α , β , γ , X y radiación neutrónica; aunque fundamentalmente se persigue frenar a los rayos γ y la radiación neutrónica ya que los rayos α y β son menos penetrantes y de más fácil absorción [33].

2.5.5 Protección frente a la radiación neutrónica

Existen características de los neutrones que son esenciales en la elección de los mejores materiales de protección neutrónica y estas características son las siguientes:

- . Los núcleos de átomos pesados (uranio, plutonio, torio) al ser bombardeados con neutrones se dividen formando núcleos de átomos más ligeros con emisión de neutrones y gran desprendimiento de energía; en esta característica se basan las reacciones nucleares de fisión Figura 2.79.

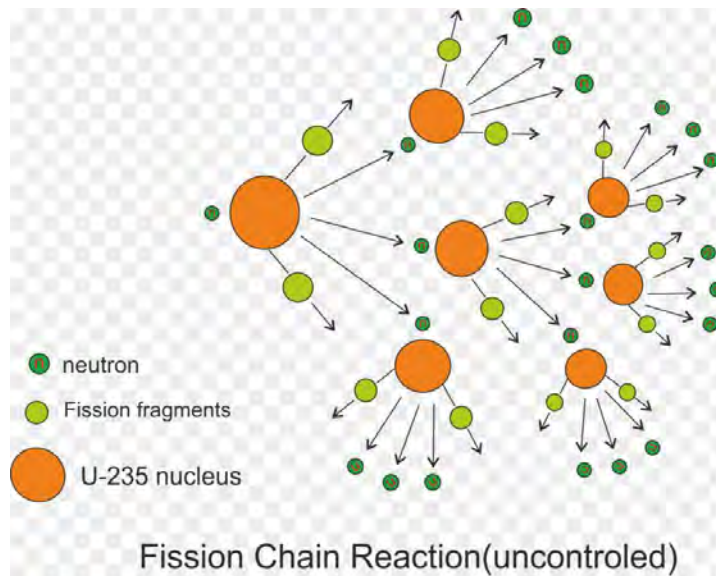


Fig. 2.79 Esquema de reacción de fisión nuclear en cadena (foronuclear.org).

Los neutrones no tienen carga eléctrica con lo cual no pueden ser desviados por fuerzas eléctricas.

. Los neutrones son un tipo de radiación altamente penetrante.

. El neutrón libre tiene una alta energía y velocidad y es el llamado neutrón rápido. Mediante el proceso de moderación (choque con elementos ligeros; hidrogeno, deuterio, carbono) el neutrón pierde energía y se transforma en un neutrón térmico (lento) de mucha menor energía y velocidad [32] Figura 2.80 y Tabla 20.

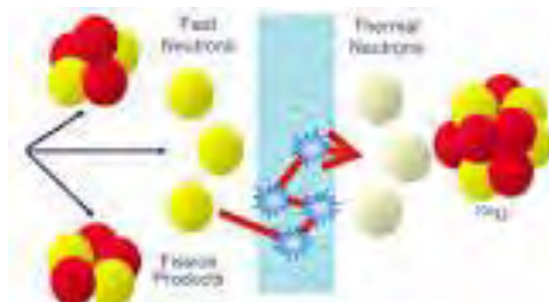


Fig. 2.80 Moderación de neutrones (mitosnucleares.wordpress.com).

. La absorción de un neutrón produce el inicio de una reacción nuclear; lo cual conlleva también la emisión de otros tipos de radiaciones α , β , γ [32].

. Los neutrones hacen que la materia sea radiactiva de forma que además de los neutrones, se debe procurar protección contra los otros tipos de radiación [32].

Tabla 20. Clasificación energética de neutrones (fuente docplayer.es)

Tipo de neutrones	Energía eV	Velocidad m/s
Rápidos	10^6	$1,4 \cdot 10^7$
Térmicos	10^2	$1,4 \cdot 10^5$
Lentos	0,025	$2,2 \cdot 10^3$

Una vez que se ha visto las características a tener en cuenta de los neutrones, el blindaje frente a los neutrones implica fundamentalmente hacer frente a tres problemas, derivados de la naturaleza de los neutrones y que se describen a continuación y que los materiales de protección neutrónica deben ser capaces de tener:

- **Ralentizar los neutrones:** mediante el principio de la moderación de neutrones. Para ello son adecuados solamente materiales que contengan átomos ligeros (átomos de hidrogeno, por ejemplo) como H_2O , polietileno y hormigón. Esto es debido a que el núcleo de hidrogeno está compuesto solamente por 1 protón que tiene una masa similar a la de 1 neutrón y por tanto cuando 1 neutrón choca contra un núcleo de hidrogeno se transmite toda o gran parte de la energía cinética del neutrón al núcleo de hidrogeno. Utilizando el símil de un billar; cuando una bola blanca y otra bola de billar tienen masas idénticas, la bola blanca que golpea a otra bola puede detenerse y la otra bola comenzará a moverse con la misma velocidad. Sin embargo, si se hace impactar una pelota de ping pong (neutrón) contra una bola de bolos (núcleo pesado) la pelota de ping pong rebotará sin gran variación de velocidad y variando solamente la dirección [32].

- **Absorción de los neutrones ralentizados:** los neutrones térmicos se absorben mediante captura en materiales de boro, litio o cadmio. Generalmente una capa delgada de dicho absorbente es suficiente para proteger los neutrones térmicos.

- **Protección frente a la radiación producida:** en el caso de la protección con Cd, la absorción de neutrones tiene como consecuencia la emisión de radiaciones y siendo necesaria una protección adicional. Este fenómeno apenas se produce en el Li y menos aún en el caso de emplear B como protector, sobre todo si el B está en forma de ácido bórico (BO_3H_3) que es muy soluble en agua [32].

2.5.6 El hormigón como escudo de neutrones

El blindaje de neutrones más utilizado en muchos sectores de la ciencia e ingeniería nuclear es el escudo de hormigón. El hormigón es un material que contiene hidrogeno y a diferencia del agua tiene una densidad más alta.

El objetivo principal en el blindaje radiológico es lograr un material pesado y en el caso del concreto, es el árido el que más influye en la obtención de un hormigón pesado [33].

En Figura 2.81 se representa el hormigón pesado que sirve de protección en los reactores nucleares



Fig 2.81 Reactor nuclear (severoochoa.com).

Estos áridos serán siempre áridos de alta densidad y se emplean con dos objetivos principales; el primero atenuar los rayos gamma y el segundo absorber los neutrones. Para el primer objetivo se emplean áridos de alta densidad y para el segundo objetivo se emplean áridos de bajo peso molecular.

2.5.6.1 Tipos de áridos para protección radiológica

Según la ASTM C638 denomina a estos áridos como Clase 1 (protección frente a rayos γ) y Clase 2 (protección neutrónica). La Clase 1 incluye minerales y rocas de alta densidad y la Clase 2 minerales y rocas que son especialmente efectivos en la absorción de neutrones sin producir grandes penetraciones de rayos gamma y que contienen cantidades significativas de boro [33].

2.5.6.2 Áridos para la protección neutrónica

Los rayos gamma resultantes del paso por el isótopo más ligero del boro, boro 10, son considerados menos penetrantes que los resultantes del paso por el hidrógeno y debido a esto son más frecuentes el boro y sus compuestos en la protección neutrónica [33].

A continuación, se enumeran algunos de los áridos más frecuentes para la obtención de hormigones de protección neutrónica:

. **Colemanita**: se encuentra en depósitos de evaporitas. Químicamente es un borato cálcico hidratado ($\text{Ca B}_3\text{O}_4 (\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y es una excelente fuente de introducir boro en el vidriado Figura 2.82.



Fig. 2.82 Colemanita (asturnatura.com).

. **Borocalcita**: químicamente es borato cálcico $\text{Ca} (\text{BO}_3)_2$ y se utiliza como fundente en cerámica y en algunos esmaltes cerámicos. Es una forma insoluble del boro por tanto una frita natural. La forma hidratada es la colemanita.

. **Cristales de fritas de boro**: son vidrios transparentes, incoloros y sintéticos, producidos por la fusión durante la fabricación de esmaltes cerámicos. Aparte del boro, estos cristales contienen SiO_2 , Al_2O_3 y Ca principalmente. En Figura 2.83 se muestran cristales de frita de boro.



Fig. 2.83 Cristales de frita de boro (cerámica.com).

. **Ulexita**: se trata de un borato hidratado de sodio y calcio $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Se presenta en forma redondeada con pequeños nódulos. Se suele encontrar en zonas desérticas y es muy común en lagos salinos desecados en los que se forman por precipitación al evaporarse el agua. Su nombre se debe al químico alemán George Ulex. En Figura 2.84 se muestra una porción de mineral de ulexita.



Fig. 2.84 Ulexita (geología.com).

. **Bórax**: químicamente es borato de sodio o también llamado tetraborato de sodio $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y es un importante compuesto del boro. Está formado por cristales blancos, solubles en agua y se origina de forma natural en los depósitos producidos por evaporación continua de lagos, encontrándose los depósitos más importantes en Estados Unidos, Bolivia y en el desierto de Atacama.

A modo de resumen se presenta la Tabla 21 en la cual se detallan las características físicas y composiciones químicas de los minerales estudiados para la obtención de áridos de protección neutrónica.

Tabla 21. Áridos utilizados en protección neutrónica. (Wikipedia)

Mineral	Formula química	Densidad	Dureza Mohs
Colemanita	$\text{CaB}_3\text{O}_4(\text{OH})_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2,41- 2,42	4,5
Ulexita	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	1,96	2,5
Bórax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	1,73	2 – 2,5

Se debe tener en cuenta que tanto los minerales de boro como la frita de boro producen cierto retardo en el fraguado del hormigón y que se puede emplear aditivos aceleradores para minimizar este inconveniente [33].

2.5.7. Dosificaciones de hormigones de protección neutrónica y características

Son conocidas masas para obtener un hormigón vertido para la atenuación y absorción de neutrones a base de cemento Portland, agua, aditivos y áridos que los diferencian de los hormigones convencionales. Estos hormigones no son de alta densidad ya que los áridos empleados tampoco lo son. Estos áridos son ricos en boro y con una densidad comprendida entre 2,4 y 2,7 g/cm³ como es el caso de emplear colemanita (2,41 – 2,42 g/cm³) o en el caso de emplear residuos procedentes de fritas cerámicas; como es el caso objeto de esta investigación que tienen una densidad de 2,63 g/cm³.

A continuación, se expone un cuadro de dosificación para un hormigón convencional tipo: HA-30/F/20/Ila (hormigón armado, con una resistencia de 30 N/mm², consistencia fluida, con un tamaño máximo de árido de 20 mm y expuesto a ambientes de humedad alta) [33].

Tabla 22. Dosificación hormigón convencional HA-30/F/20/Ila

Componente	Densidad g/cm ³	Proporción kg/m ³
CEM II A/L 42,5 R	3,1	325 (105 l/m ³)
Agua	1,0	180 (180 l/m ³)
Árido	2,5	1845 (738 l/m ³)
Aditivo superplastificante	1,1	2,6 (2,4 l/m ³)
Hormigón final	2,353	

Como se observa en la Tabla 22; el cemento empleado es un Portland con aditivos ya que contiene entre un 65 – 94 % de clinker y un 6 – 20 % de caliza con una resistencia de 42,5 y de alta resistencia inicial.

Las relaciones agua/cemento son altas para lograr una pasta con un alto contenido de hidrogeno que colabore en la protección frente a la radiación neutrónica.

Las instalaciones con hormigón de protección neutrónica están fabricadas con altos espesores de pared para asegurar altos contenidos de hidrogeno que moderen a los neutrones rápidos y absorber a los neutrones lentos mediante el boro contenido en los áridos de este tipo de hormigones.

Revisando información relativa al tema, he encontrado una patente de invención española, solicitada por la empresa ARRAELA S.L. con número de solicitud 200900481 y número de publicación ES 2344290, en la que se descubre una masa para la fabricación de productos con alta capacidad de protección neutrónica (hormigón, losetas, morteros) [34].

En la masa que indica la invención, en lugar de cemento Portland, utiliza cemento de alúmina Al_2O_3 ; siendo el contenido de Al_2O_3 entre el 36 y el 45%, pudiendo llegar al 70%. Introduce en la masa un componente nuevo el CaSO_4 anhidro con un alto grado de pureza. Como árido emplea la colemanita (borato de calcio) y aditivos [34].

De la combinación de este tipo de cemento y del CaSO_4 anhidro se obtiene una cristalización rápida de Ettringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$) aumentando de una manera importante la cantidad de moléculas de hidrogeno, muy eficaces para la captura de los neutrones rápidos, los cuales son termalizados y convirtiéndose en neutrones térmicos (lentos) que son absorbidos por el boro contenido en la mezcla.

El objetivo de esta invención es conseguir una masa con un óptimo efecto barrera frente a los neutrones de diversa energía y que permita una acusada reducción del espesor de las barreras de blindaje frente a materiales estándar para conseguir el mismo efecto barrera a las radiaciones neutrónicas.

Capítulo 3 Materiales y metodología experimental

3.1 Introducción

En este capítulo, se describen los materiales empleados en las diferentes mezclas, así como los procedimientos llevados a cabo sobre los diversos materiales de forma individual, tanto de caracterización física como química y sobre las diversas mezclas de morteros (convencionales y autonivelantes), hormigones (autocompactantes y de protección neutrónica); tanto en estado fresco como endurecido. Los resultados se presentan en el Capítulo 4.

El trabajo experimental desarrollado, tiene como objetivo la fabricación de morteros y hormigones con altas prestaciones, empleando residuos cerámicos generados como subproducto de la fabricación de acero vitrificado. Estos residuos se utilizarán bien como reemplazo de cemento Portland en la fabricación de morteros convencionales; como árido fino (filler) en la fabricación de morteros autonivelantes, hormigones autocompactantes y de protección neutrónica y como materia prima en la obtención de clinker en la fabricación de cemento Portland.

Para la confección de estos morteros y hormigones se han utilizado en la investigación; cementos convencionales Portland, áridos silíceos y cálcicos y residuo cerámico como árido fino, lo cual ha requerido la valoración de la porción fina (residuo) en la fluidez de las mezclas.

Para la confección de hormigones de protección neutrónica, se ha dosificado el residuo cerámico como árido cuyo cometido será la absorción de los neutrones térmicos ya que los neutrones rápidos son ralentizados por el propio hormigón; esta absorción de neutrones térmicos se realizará por el boro existente en el residuo cerámico, como se verá en la caracterización química de dicho residuo.

Tras las dosificaciones de los distintos morteros y hormigones y una vez endurecidas las mezclas se han realizado ensayos para obtener las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de las distintas combinaciones investigadas.

3.2 Residuo cerámico de esmalte vítreo objeto de la investigación

En el punto 2.2 del Estado del Conocimiento se realizó una extensa exposición del origen de estos residuos cerámicos, así como de los centros productivos que los generan.

Estos residuos cerámicos de esmalte vítreo proceden de las instalaciones de esmaltado vítreo de chapa de acero pertenecientes a las empresas que forman el GRUPO VITRINOR (VITRISPAN S.A y VITRINOR.S.A. L).

La generación de estos residuos cerámicos se puede resumir en los siguientes esquemas:

Residuos cerámicos procedentes de la recogida de aguas residuales. Todas las aguas residuales, cargadas de sólidos en suspensión de partículas de esmalte vítreo, procedentes de la sala de molinos y las secciones de esmaltado, son enviadas a pozos de decantación ubicados en el exterior de fábrica y de estos a instalación de filtros-prensa, en los cuales se obtienen tortas de filtrado con el residuo cerámico y saliendo el agua limpia de la carga contaminante. Se adjunta esquema Figura 3.1 y fotografías de piscinas de decantación, filtros- prensa y tortas de residuo cerámico. Figuras 3.2; 3.3 y 3.4.



Figura 3.1 Esquema de aguas residuales cargadas de partículas de esmalte.



Figura 3.2 Piscinas de decantación.



Figura 3.3 Filtros- prensa.



Figura 3.4. Tortas de residuo cerámico.

Residuos cerámicos procedentes de las instalaciones de aplicado de esmalte vítreo.

En estas instalaciones el esmalte fabricado en molinos se aplica en cabina con pistolas neumáticas, provistas de aspiración. Durante la aplicación, hay parte del esmalte que es recogido por la aspiración de estas cabinas de aplicación y cuya aspiración está conectada con varias instalaciones de filtros de mangas que retienen las partículas de esmalte, dejando salir el aire limpio. Todas estas partículas son almacenadas en big-bag en estado polvo. En Figura 3.5 se representa esquemáticamente este proceso y en Figuras 3.6 y 3.7 se detallan los filtros de mangas y el residuo polvo obtenido.



Fig. 3.5 Esquema de recogida de residuo procedente de la aplicación en esmaltería.



Fig. 3.6 Filtro de mangas.



Fig. 3.7 Big – bag con residuo polvo.

Al final del proceso, tenemos un solo residuo, pero en tres estados físicos diferentes ya que sus características físicas (humedad) son diferentes, siendo sus características químicas totalmente homogéneas en los tres estados como se podrá apreciar en la caracterización del residuo.

Estos tres estados del residuo se llamarán: fangos, tortas y polvo; tal como se representan en Figura 3.8.

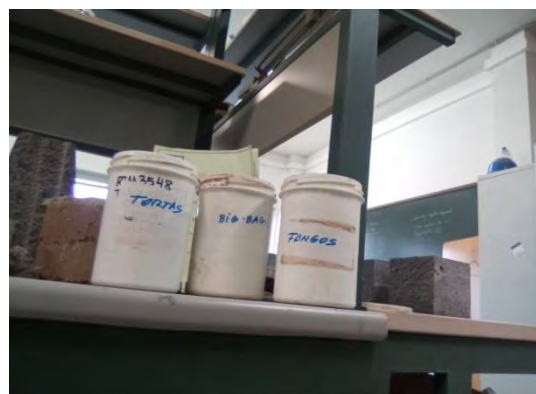


Figura 3.8. Estado residuos; tortas (izquierda), polvo (centro) y fangos (derecha).

En Tabla 23 se indican las humedades de estos tres estados del residuo.

Tabla 23. Humedad del residuo en los tres estados.

Estado	% Humedad
Fango	132,72
Tortas	27,19
Polvo	2,74

3.3 Materiales empleados en la investigación

Los materiales utilizados en los procesos de elaboración de probetas de morteros y hormigones han sido los que se enumeran seguidamente. Todos los materiales han sido proporcionados por LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales) ubicado en la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria. El residuo de esmalte cerámico se ha obtenido de la empresa VITRINOR S.A.L.

Cemento Tipo, I Clinker- Portland CEM I 52,5R. Este tipo de cemento Portland, tiene entre un-95- 100 % de Clinker siendo lo habitual un 97 % y un 4 % de yeso. Su densidad es de 3 g/cm³. El cemento utilizado tiene según las especificaciones una resistencia a compresión a los 28 días de 52,5 MPa y de alta resistencia inicial. Figura 3.9.

Arena de sílice, arena fina de SiO₂, con un tamaño máximo de grano de 2 mm. Humedad 0,37 % y densidad 2,63 g/cm³.

Agua potable, libre de sustancias perjudiciales que puedan alterar las propiedades reológicas de las mezclas, procedente de la red existente en los laboratorios de LADICIM.

Filler calizo, árido fino con un tamaño de partículas <100 µm, humedad 1,25 % y una densidad de 2,72 g/cm³. Figura 3.10.

Residuo de esmalte cerámico. Lote de 20 kg de residuo polvo Figura 3.11. El residuo tiene un color amarronado / rojizo debido a los colorantes de los esmaltes utilizados, principalmente colorantes con óxido férrico (Fe₂O₃) y sulfuro de cadmio (SCd). Asimismo, el residuo tiene un pronunciado olor amoniacal debido a la urea [CO (NH₂)₂ aminometanamida] que se añade a las barbotinas de esmalte molido antes de su aplicación. La urea es añadida en solución acuosa al 0,1 – 0,5%. La urea una vez que está en la barbotina se va descomponiendo en CO₂ y NH₃; de ahí su olor amoniacal del residuo.

El residuo tiene una densidad de 2,63 g/cm³ y una humedad de 2,74%. Se utilizará como reemplazo de cemento Portland en los morteros tradicionales; como reemplazo

de materia prima en la obtención de clinker de cemento Portland y como árido fino (filler) en el resto de las composiciones.

El residuo ha sido sometido para los ensayos a un proceso de eliminación de humedad en estufa de laboratorio de LADICIM Figura 3.12. Este proceso se ha realizado a 105 °C durante 24 h, obteniendo una humedad final constante de 0,58%.

Arena caliza (CaCO_3) natural de machaqueo, con tamaño de grano 0-2 mm, densidad 2,65 g/cm³ Figura 3.13.

Gravilla caliza (CaCO_3), natural de machaqueo con tamaño de grano 0-6 mm y 6-12 mm Figura 3.14 y 3.15.

Grava caliza (CaCO_3), natural de machaqueo con tamaño de grano de 12-18 mm y densidad 2,68 g/cm³ Figura 3.16

Las humedades de la arena calizo 0-2 y las gravas y gravillas no se han comprobado; se calcularán a la hora de hacer los diseños de las dosificaciones para tener en cuenta dicha densidad

Aditivo superplastificante de referencia Máster Ease 5025. La densidad de este aditivo es de 1,1 g/cm³ y su dosificación será al 1,5% en peso con respecto a la cantidad de cemento Figura 3.17.

Este aditivo permite fabricar morteros y hormigones de elevada fluidez (autonivelantes y autocompactantes) de altas resistencias



Fig. 3.9.CEM I 52,5 R.



Fig. 3.10 Arena de sílice 2 mm.

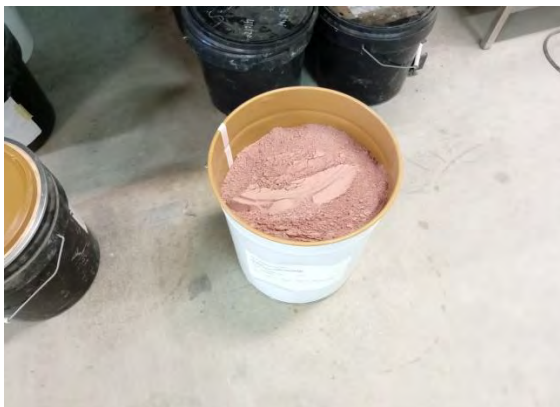


Fig. 3.11 Residuo cerámico polvo.



Fig. 3.12 Horno de LADICIM.



Fig. 3.13 Arena caliza 0-2 mm.



Fig. 3.14 Gravilla caliza 0-6 mm.



Fig. 3.15 Gravilla caliza 6-12 mm.



Fig. 3.16 Gravilla caliza 12-18 mm.



Fig.3.17. Aditivo superplastificante Máster Ease 5025.

3.4 Caracterización del residuo cerámico empleado en la investigación

El residuo empleado en la investigación ha sido caracterizado químicamente mediante diferentes técnicas analíticas para establecer su composición química y físicamente de los parámetros de densidad, humedad y porcentaje de producto vítreo (frita) existente en el residuo.

3.4.1 Caracterización química

3.4.1.1 Espectrometría de Dispersión de Energías de Rayos X. (X- Ray Energy Dispersive Spectrometry) EDX

Fundamento teórico. Esta técnica de análisis se basa en que cuando un electrón con una determinada energía choca contra una muestra, pueden ocurrir varios supuestos y cada uno de estos supuestos, determina una respuesta diferente [35].

El electrón atraviesa limpiamente la muestra sin interactuar con los átomos componentes de la muestra [35].

La segunda posibilidad es que el electrón pase lo bastante cerca del núcleo como para ser atraído por la carga positiva de éste; sufriendo una desviación en su trayectoria inicial. Si el electrón sufre una desviación mayor de 90°, el electrón vuelve a salir de la muestra por donde entró y en este caso hablaríamos de “electrones retro dispersados” muy utilizados en la microscopia de barrido SEM, Figura 3.18 [35].

La tercera posibilidad es que el electrón sufra una desviación de su trayectoria y además pierda energía. En este caso es emitido un cuanto de radiación para conservar el balance energético. Esta radiación emitida se conoce como “bremsstrahlung” que significa “radiación de frenado” en alemán y la cual genera un espectro continuo, independiente de la composición química de la muestra [35].

La cuarta posibilidad es que el electrón visitante intente con alguno de los electrones de los átomos de la muestra y acabe expulsándolos del átomo. Este electrón expulsado se llama “electrón secundario” y el que lo ha expulsado “electrón primario” Figura 3.18. Los electrones secundarios son fundamentales en la microscopia electrónica de barrido SEM. El electrón primario continua su camino, pero desviado y con menos energía.

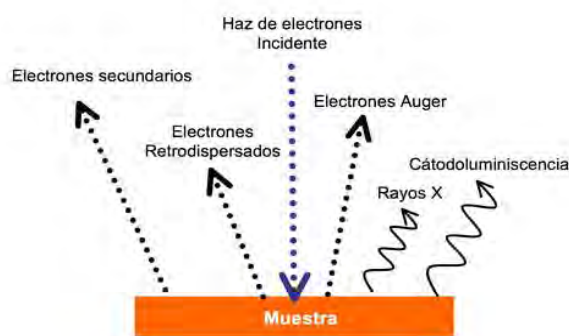


Fig. 3.18 Choque de electrones con la materia.

El átomo queda en ese momento con un excedente de energía que se resuelve de dos formas:

Para volver al equilibrio, el átomo expulsa un electrón de la capa externa que se conoce como “electrón de Auger” Figura 3.18.

Para volver al equilibrio, el átomo emite un fotón (partícula elemental que compone la luz y es portadora de radiación electromagnética) de Rayos X. Esto, es la base de la espectrografía por dispersión de energías de rayos X (EDX) [35].

La radiación producida por este salto de electrones entre orbitales tiene una propiedad fundamental y es que la energía de los fotones emitidos está directamente relacionada con el peso atómico del elemento emisor. De este modo podemos asociar cada valor de la energía emitida con un elemento de la Tabla Periódica y midiendo con un detector apropiado, los fotones expulsados podemos saber:

- . Por la energía de cada fotón, se identifica el elemento que la está produciendo (análisis cualitativo) Figura 3.19.
- . Por el nº de fotones emitidos de cada energía, la cantidad de cada elemento (análisis cuantitativo).

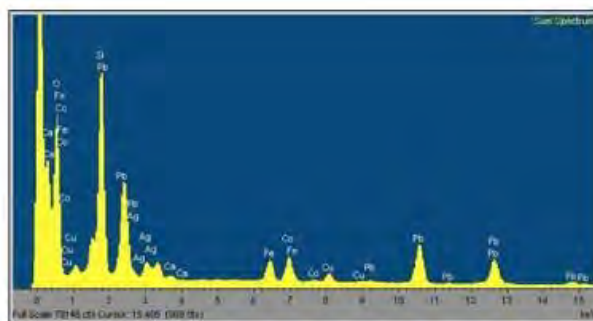


Fig.3.19. Espectro de Rayos X con diferentes energías.

Realización del ensayo. El ensayo se realiza sobre los tres estados del residuo cerámico: fangos, tortas y polvo. De cada estado se realizan dos ensayos de partes diferentes de las muestras; con el objetivo principal de ver la homogeneidad de los diferentes estados del residuo ya que teóricamente su composición química debe ser muy similar.

El equipo utilizado para la caracterización ha estado compuesto por:

Microscopio electrónico de barrido; también conocido por las abreviaturas SEM o MED (Scanning Electrón Microscope). Este microscopio tiene la particularidad de producir imágenes utilizando interacciones electrón – materia. Para la generación de electrones, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento de Hexa boruro de lantano) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra. El modelo de SEM utilizado es de presión variable modelo CARL ZEISS EVO MA 15.

Espectrómetro de energía de dispersiva EDX, equipado con un detector de rayos X de OXFORD INSTRUMENTS el cual detecta la composición elemental del material a ensayar Figura 3.20.



Fig.3.20 Microscopio electrónico de barrido (LADICIM).

Las muestras se han pulverizado y secado, haciendo pasar el haz de electrones barriendo un área específica seleccionada; detectando posteriormente los rayos X.

Los resultados que se presentan se han obtenido por energía de dispersión de rayos X, que, en primer lugar, reconoce la concentración de los diversos elementos químicos del residuo cerámico y mediante transformación estequiométrica, convierte el resultado en concentración de compuestos en forma de óxidos.

En Figuras 3.21, 3.22 y 3.23; se presentan resultados obtenidos correspondientes a la muestra de big- bag (polvo cerámico).

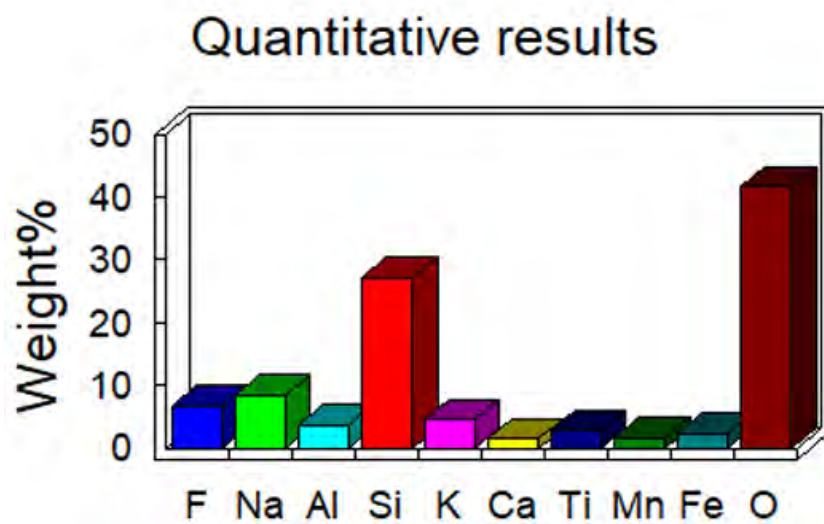


Fig. 3.21. Composición de elementos de la muestra 1 de polvo cerámico.

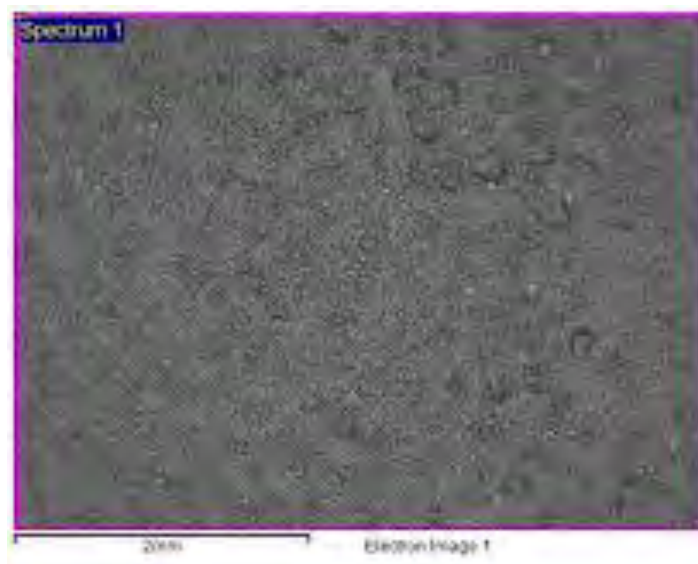


Figura 3.22. Microfotografía de partícula de residuo de polvo cerámico.

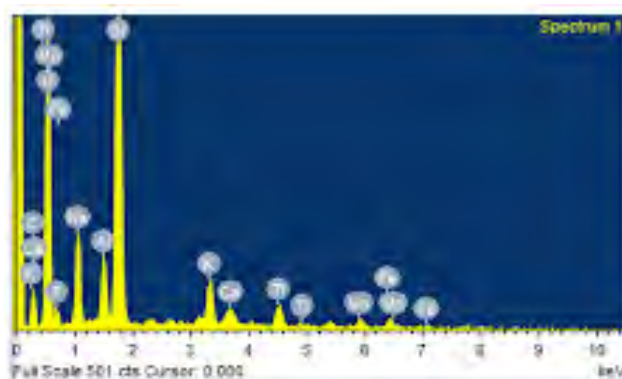


Fig. 3.23 Espectro energético detectado de la muestra 1 de polvo cerámico.

En total se han realizado 6 mediciones; 2 de cada uno de los estados; polvo, tortas y fangos. En Tabla 24, se presentan los elementos detectados en el análisis EDX a las 6 muestras correspondientes a los tres estados.

Tabla 24 Elementos detectados en el análisis EDX del residuo cerámico en los tres estados (% Peso).

% Peso												
Elemento	F	Na	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	O	P	Total
Polvo muestra 1	10,46	8,40	3,38	26,51	3,83	1,20	2,98	1,30	1,68	40,25		100
Polvo muestra 2	6,63	8,28	3,60	27,15	4,48	1,48	2,87	1,68	2,27	41,53		100
Torta muestra 1	4,31	6,61	4,90	27,62	2,75	3,44	1,30	0,49	4,77	43,21	0,60	100
Torta muestra 2	2,89	6,55	5,14	27,63	2,55	3,73	1,60	0,84	4,35	43,92	0,78	100
Fango muestra 1	7,65	5,17	6,88	25,90	2,40	3,39	1,45	0,78	2,60	42,66	1,12	100
Fango muestra 2	6,81	5,52	6,67	25,40	2,57	4,08	1,56	1,05	2,59	42,56	1,18	100

En Tabla 25 se presentan los óxidos obtenidos estequiométricamente a partir de los elementos detectados por el análisis EDX.

Tabla 25. Óxidos obtenidos estequiométricamente tras el análisis EDX.

% Peso									
Compuesto	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe O	MnO
Polvo muestra 1	11,32	6,39	56,72		4,62	1,69	4,97	2,16	1,68
Polvo muestra 2	11,16	6,81	58,08		5,39	2,06	4,79	2,91	2,17
Tortas muestra 1	8,91	9,25	59,08	1,37	3,32	4,82	2,17	6,14	0,63
Tortas muestra 2	8,82	9,72	59,11	1,79	3,08	5,22	2,67	5,60	1,09
Fangos muestra 1	6,97	13,00	55,40	2,58	2,97	4,74	2,42	3,34	1,01
Fangos muestra 2	7,44	12,61	54,34	9,71	3,10	5,71	2,60	3,33	1,36

Los resultados obtenidos permiten separar los óxidos de los distintos elementos detectados. Estos óxidos se componen mayoritariamente de SiO₂ (54- 59 %), seguido de los óxidos de Na, Al, K y Fe; identificados como Na₂O, Al₂O₃, K₂O y FeO.

Son minoritarios los óxidos de Ca y Ti identificados como CaO y TiO₂.

Los óxidos de Mn, identificados como MnO; son residuales, apareciendo principalmente debido a la composición de los colorantes empleados en las formulaciones de esmalte.

El residuo en los tres estados se puede decir que es bastante homogéneo.

3.4.1.2 Espectroscopia de emisión atómica por plasma de microondas AES (Atomic Emission Spectroscopy)

Esta técnica analítica se ha empleado para poder detectar la cantidad de boro de la muestra ya que debido al bajo número atómico (5) no es detectado con otras técnicas analíticas.

La determinación del boro es importante ya que una de las posibles utilidades del residuo cerámico es su utilización en la confección de hormigones de protección neutrónica como absorbente de neutrones térmicos.

Fundamento teórico; la espectrometría de emisión atómica es un método instrumental de análisis químico, que se fundamenta en la excitación de los átomos.

Un átomo excitado es un átomo que ha salido de su estado fundamental ya que, en su estado fundamental, cada electrón ocupa su lugar en su órbita alrededor del núcleo. Cuando se excita el átomo, algún electrón salta de la órbita que ocupa en su estado fundamental a una órbita superior y más alejada del núcleo. Para que esto ocurra es necesario una aportación de energía; la cual en esta técnica se aporta por medio de llama, plasma o chispa.

El átomo excitado es inestable y vuelve a su estado fundamental, emitiendo en forma de radiación electromagnética (luz) la energía que el electrón pierde al volver a su órbita fundamental. La longitud de onda de esta radiación electromagnética emitida es de un color característico de cada elemento químico y determina la identidad del elemento mientras que la intensidad de luz emitida es proporcional a la cantidad de átomos de cada elemento.

Realización del ensayo; este ensayo se ha realizado en la Unidad de Tránsito de SOSPROM de la Universidad de Cantabria y dependiente del Departamento de Ingeniería Química y Biomolecular.

El ensayo se ha realizado solamente con el residuo en polvo; debido a que el residuo en los tres estados es bastante uniforme en sus análisis químicos (Tablas 24 y 25) y porque es sobre este estado del residuo cerámico en el que trabajaremos posteriormente.

La muestra ha sido sometida a digestión ácida mediante NO_3H (ácido nítrico) y ClH (ácido clorhídrico). Para el análisis se han realizado rectas de calibración externa con concentraciones de 0 – 0,5 – 1 – 3 – 5 mg/l de B y medida del B de la muestra a 294,677 nm de longitud de onda.

El instrumental utilizado en esta técnica analítica ha sido los siguientes:

Microondas para digestión ácida de la muestra cerámica Ethos One Marca Milestone, capaz de generar ondas microondas que son capaces de conseguir altas temperaturas y presiones. Este microondas está formado por la cavidad de generación de microondas, el rotor, pantalla de control y sistema de vasos de digestión formado por 10 cavidades. Figuras 3.24 y 3.25.



Fig. 3.24. Microondas Ethos One Milestone (SOSPROCAN).



Fig. 3.25. Sistema de vasos de digestión y rotor (SOSPROCAN).

Espectroscopio de emisión atómica MP- AES 4200 Marca Agilent Technologies Figura 3.26.

Para el análisis se ha utilizado plasma de nitrógeno para desolvatar, atomizar y excitar los átomos de la muestra obtenida por digestión ácida, alcanzando temperaturas de 5000 K. La intensidad de la luz emitida se mide mediante detección óptica en la longitud de onda característica del boro. Una vez que se tiene el % de B y en función de la relación de pesos moleculares se obtiene el % de B_2O_3



Fig. 3.26 Espectroscopio de emisión atómica AES 4200 Agilent Technologies (SOSPROCAN).

En la Tabla 26 se indican los % de B y de B_2O_3 obtenidos tras el análisis efectuado.

Tabla 26. Análisis de Boro del residuo cerámico.

Muestra	% B	% B_2O_3
Residuo polvo	4,19	13,48

3.4.2 Caracterización física

Se realizan ensayos para la determinación de humedad, densidad y materia vítrea existente en el residuo cerámico.

3.4.2.1 Determinación de humedad de los residuos cerámicos y de algunos materiales empleados en la investigación.

El objeto del ensayo es determinar la cantidad de agua presente en una determinada muestra y está basado en la pérdida de peso de dicha muestra por calentamiento en estufa de laboratorio, refiriendo su peso al peso total de la muestra y expresada en porcentaje.

Los aparatos necesarios para la realización del ensayo son: estufa de laboratorio, balanza de precisión y desecador. Figura 3.27



Fig. 3.27 Estufa de laboratorio, balanza de precisión y desecador.

El ensayo se realiza siguiendo el siguiente procedimiento:

Pesar en un crisol; previamente tarado, la muestra a ensayar, bien homogeneizada.

Colocar el crisol con la muestra en estufa y mantener a 110°C durante 4 horas.

Sacar de estufa la muestra y colocar en desecador hasta que la muestra alcance la temperatura ambiente; aproximadamente 15 – 30 minutos.

Pesar en la balanza.

Volver a colocar muestra en estufa 30 minutos, sacar de estufa, enfriar en desecador y volver a pesar.

Continuar la desecación hasta que el peso permanezca constante.

Los cálculos de % de humedad, se realizan a partir de la pérdida de peso de la muestra

$$\% \text{ Humedad} = M_1 - M_2 / M_2 \times 100$$

M_1 = Peso muestra húmeda

M_2 = Peso muestra seca

En Tabla 27 se presentan los resultados obtenidos, tanto de los estados polvo y tortas del residuo cerámico como de algunos materiales utilizados en la fabricación de morteros y hormigones.

Tabla 27. Resultados de % humedad

Material	Peso muestra húmeda (g)	Peso muestra seca en (g)	% humedad
Residuo polvo	56,55	55,04	2,74
Residuo tortas	89,87	70,66	27,19
Arena sílice grano 2	614	612	0,37
Filler calizo <100 μm	340	336	1,25
Filler residuo polvo	224	222	0,70

3.4.2.2 Determinación de la densidad

La densidad es una magnitud escalar, referida a la cantidad de masa de un determinado volumen de una sustancia. Se simboliza con la letra rho (ρ) del alfabeto griego. Se expresa en g/cm^3 .

Para el cálculo de densidades de sólidos, como es el caso, es imprescindible el Principio de Arquímedes como fundamento teórico; el cual dice “Todo cuerpo sumergido en un líquido experimenta una fuerza igual y de sentido contrario al peso del volumen del líquido desalojado”.

Para la realización del ensayo son necesarios: picnómetro de Le Chatelier, también llamado matraz de Le Chatelier y balanza de precisión. Figura 3.28



Fig. 3.28. Matraz de Le Chatelier y balanza de precisión.

El método operativo realizado es el siguiente:

Se introduce agua en el picnómetro, limpio y seco.

Se enrasa picnómetro a cero o a cualquier volumen V_i (Volumen inicial).

Se tara la balanza y se agrega material a ensayar al picnómetro por medio de un embudo, cuidadosamente. Cualquier partícula que quede adherida en las paredes, debe ser escobillada dentro del picnómetro.

El picnómetro es entonces tapado y agitado hasta que todas las burbujas desaparezcan y el sólido es mojado homogéneamente. Se mide V_f (Volumen final).

Se vuelve a pesar en la balanza para saber el peso del sólido.

Los cálculos se realizan en función de la siguiente fórmula:

$$\rho = \Delta P / \Delta V = P_i - P_f / V_i - V_f$$

En Tabla 28 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 28 Densidades obtenidas.

Material	V_i (cm ³)	V_f (cm ³)	P_f (g)	P_i (g)	ρ (g/cm ³)
Arena de sílice grano 2 mm	21	0,90	162,8	215,6	2,63
Filler calizo < 100µm	18,9	0,90	90,8	139,7	2,72
Filler residuo	19,6	0,40	4,20	54,80	2,63

3.4.2.3. Determinación de la parte vítrea del residuo cerámico

En este apartado, se calcula de una forma teórica, la cantidad de frita (producto vítreo componente del residuo cerámico) y de forma práctica, mediante su separación por métodos físicos (decantación por gravedad) del resto del residuo cerámico.

Este apartado es importante, debido a que el producto vítreo (frita) es un producto que tiene una buena resistencia a la compresión y una elevada dureza en la escala de Mohr (5-6).

Determinación teórica. Para este cálculo, se parte de tres formulaciones básicas de esmalte, representadas en Tabla 29.

Tabla 29. Formulaciones básicas de esmalte

Producto	Esmalte base (g)	Esmalte blanco (g)	Esmalte rojo (g)	Total (g)
Frita	100	100	100	300
Cuarzo	15	3	3	21
Arcilla	6.5	5	5	16,5
Aditivos	0,2	0,2	0,2	0,6
Colorante	1	-	4	5
Total	122,7	108,2	112,2	343,1

Como se observa en Tabla 29, en las formulaciones empleadas, sólo se ha tenido en cuenta los sólidos que entran en molienda y que dan origen a los residuos cerámicos.

Con estos datos; se pueden calcular los g de frita existentes por cada kg de esmalte seco; haciendo una media de los tres esmaltes básicos.

$$g \text{ (frita)} / k \text{ esmalte seco} = 300 \times 1000 / 343,1 = 874,38.$$

La cantidad de frita existente en el residuo cerámico polvo o torta, varía con relación al dato obtenido en seco ya que se debe tener en cuenta la humedad del residuo.

$$\text{Residuo polvo} = \text{Humedad } 2,74\% \quad 343,1 \times 1,0274 = 352,50 \text{ g}$$

$$g \text{ (frita)} / k \text{ residuo cerámico polvo} = 300 \times 1000 / 352,50 = 851,06$$

$$\text{Residuo en forma de tortas} = \text{Humedad } 27,19 \%. \quad 343,1 \times 1,2719 = 436,38 \text{ g}$$

$$g \text{ (frita)} / k \text{ residuo cerámico torta} = 300 \times 1000 / 436,38 = 687,47.$$

En Tabla 30, se expresan los resultados teóricos de la relación g (Frita) / kg esmalte seco y residuo polvo cerámico y residuo torta.

Tabla 30. Relación g (frita) / kg esmalte

Producto	% humedad	Peso (g)	g (frita) / kg esmalte
Esmalte seco	0	343,1	874,38
Residuo cerámico polvo	2,74	352,5	851,06
Residuo cerámico torta	27,19	436,38	687,47

A pesar de las variaciones, debido a la humedad del residuo; se observa un elevado porcentaje en la relación g de frita / kg de residuo cerámico. Este dato obtenido, se

considera importante para los posteriores ensayos de las distintas mezclas a realizar; sobre todo en morteros autonivelantes y hormigones autocompactantes.

Determinación cualitativa de la frita contenida en el residuo

Para esta determinación, se utiliza el sistema de comprobación de la finura de un esmalte una vez molido; mediante decantación de la frita en cono denominado de Bayer. El método de trabajo seguido ha sido el siguiente:

Se toma muestra de residuo cerámico en polvo y se le añade agua hasta crear una suspensión de esmalte; ajustando la densidad a $1,80 \text{ g/cm}^3$. Figura 3.29



Fig. 3.29 Barbotina de residuo polvo cerámico.

Seguidamente se toma el cono de Bayer; el cual tiene un tamiz de 325 mallas y abertura de $0,044 \text{ mm}$ y ayudándose del dosificador, vamos añadiendo la barbotina del residuo cerámico polvo en el cono de Bayer. A continuación, se hace pasar abundante agua a presión sobre la barbotina y todo el esmalte va pasando por el tamiz, salvo las partículas groseras de frita. Figura 3.30



Fig. 3.30 Cono de Bayer y tamizado de la barbotina.

Una vez que solo tenemos residuos de fritura en el tamiz; se da vuelta al cono de Bayer y se le coloca el decantador en el cual se van depositando por gravedad las partículas de fritura. Figura 3.31

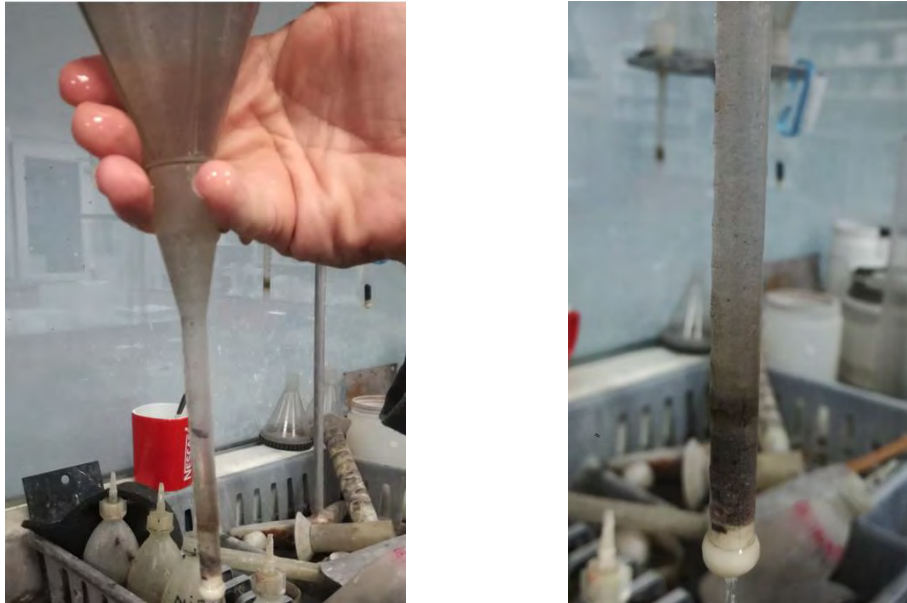


Fig. 3.31 Decantación de partículas de fritura.

En Figura 3.32; se representa la fritura obtenida del residuo cerámico y se le compara con la fritura obtenida de un esmalte virgen.



Fig.3.32 Fritura en residuo polvo (izquierda) y en esmalte virgen (derecha).

En Figura 3.33; se muestran dos microfotografías realizadas en microscopio óptico de partículas recogidas en cono de Bayer; tanto del residuo cerámico como de un esmalte virgen de producción; observándose en ambas los cristales de frita.

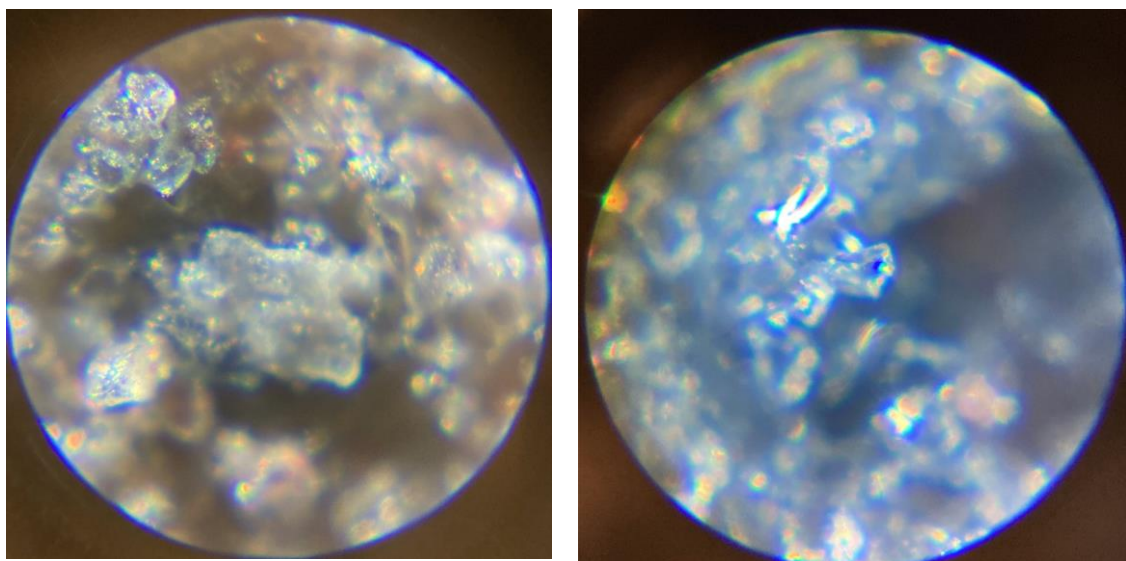


Fig. 3.33. Microfotografías residuo cerámico (izquierda) y esmalte virgen (derecha).

3.5 Diseño, fabricación y ensayos de probetas normalizadas de morteros

En este apartado, se exponen las composiciones de las diferentes mezclas realizadas con los materiales descritos en el punto 3.3 y el residuo cerámico en polvo. Se han realizado en el curso de la investigación; morteros convencionales, autonivelantes, hormigones autocompactantes y de protección neutrónica.

También en este punto; se incluyen tanto el amasado de las mezclas como la fabricación de probetas normalizadas de ensayo necesarias para la realización de posteriores ensayos de rotura a flexión y compresión; los cuales también se describen en este punto.

3.5.1 Dosificación de morteros convencionales

El objetivo que se pretende con los morteros convencionales es el aprovechamiento del residuo cerámico como material de reemplazo del cemento Portland utilizado CEM I 52,5 R. También se ha utilizado en estas dosificaciones arena de sílice de grano máximo 2 mm y agua.

La dosificación se realiza en base a los siguientes porcentajes de materiales:

Finos (cemento + residuo cerámico) = 100 % en peso.

Agua = ½ de peso de finos.

Arena de sílice de grano 2 mm = 3 veces el peso de finos.

En base a estas proporciones; se realizan Tablas 31 y 32 con las dosificaciones en % y traducidas a peso en gramos, de cada componente de las mezclas de morteros convencionales realizadas.

Tabla 31. Dosificación de materiales en porcentajes.

Muestra	% Cemento CEM I 52,5 R	% Residuo cerámico	% Agua	% Arena de sílice grano 2 mm
ME- 0	100	0,0	½ Finos	3 veces finos
ME- 5	95	5,0	"	"
ME- 10	90	10	"	"
ME- 15	85	15	"	"
ME- 20	80	20	"	"
ME- 25	75	25	"	"
ME- 50	50	50	"	"
ME- 75	25	75	"	"

Una vez que se han establecido los % en peso de los materiales; se convierten en unidades de peso (g) para poder realizarse las pesadas de los materiales.

Tabla 32. Dosificación en peso (g) de los materiales empleados.

Muestra	Cemento CEM I 52,5 R g	Residuo cerámico g	Agua cm³	Arena de sílice grano 2 mm g
ME- 0	500	0,0	250	1500
ME- 5	475	25	250	1500
ME- 10	450	50	250	1500
ME- 15	425	75	250	1500
ME- 20	400	100	250	1500
ME- 25	375	125	250	1500
ME- 50	250	250	250	1500
ME- 75	125	375	250	1500

En primer lugar, se dosificaron y amasaron morteros convencionales de las muestras ME-0; ME-25; ME-50 y ME-75. Posteriormente y con el objetivo de tener una perspectiva más completa de la evolución, tanto de la puzolanicidad como de la resistencia a flexión y compresión; se dosificaron otros morteros convencionales, con menos cantidades de residuo cerámico como reemplazo de cemento Portland; muestras ME-5; ME-10; ME-15 y ME-20.

3.5.1.1 Amasado y fabricación de probetas normalizadas de morteros convencionales

Para la fabricación de las probetas de mortero se ha procedido de la siguiente forma:

En primer lugar; se ha introducido el residuo cerámico a utilizar, en estufa de secado, ubicada en LADICIM Figura 3.12 ya que la humedad del residuo es de 2,74 %. El tiempo de secado ha sido de 24 h a 105°C, hasta peso constante, obteniéndose una humedad final del residuo de 0,58 %. Con dicha humedad del residuo cerámico se trabajarán las diferentes masas dosificadas en la Tabla 32.

Para hacer las dosificaciones en peso de las mezclas correctamente, se ha utilizado una balanza de precisión, en la que se han pesado todos los materiales a utilizar, siguiendo las pautas establecidas en la Tabla 32.

En Figuras 3.34; 3.35 y 3.36 se muestran fotografías de las pesadas correspondientes al agua, arena de sílice y a las muestras ME-0 y ME-25



Fig.3.34 Pesado de agua (250 g) y arena de sílice de grano 2 mm (1500 g).



Fig. 3.35 Pesado de cemento CEM I 52,5 en ME-0 (500 g).



Fig. 3.36 Cemento CEM I 52,5 (375 g) y residuo cerámico (125 g). Muestra ME-25.

Una vez que se han realizado las pesadas; en Figuras 3.37 y 3.38, se muestran los componentes preparados para el amasado, correspondientes a las muestras de referencias ME-0; ME-25; ME-50 y ME-75; todas ellas a falta de 1500 g de arena de sílice grano 2 mm, en cada referencia citada.



Fig.3.37 Componentes de los morteros de referencias ME-0 y ME-25.



Fig. 3.38 Componentes de los morteros referencias ME-50 y ME-75.

El procedimiento seguido para el amasado y fabricación de probetas normalizadas ha sido el especificado en la norma UNE- EN 196-1 y los pasos seguidos han sido los siguientes:

- Se vierten en la amasadora el agua y los finos (cemento + residuo cerámico). Se pone en marcha la amasadora, a velocidad lenta, durante 30 s. A continuación, se vierten los 1500 g de arena sílicea de grano 2 mm, volcándola repartida en 30 s. Después, se pone la velocidad rápida y se amasan otros 30 s.
- Se para la amasadora y, durante 15 s, se separa el mortero adherido a la superficie lateral, empujándola hacia el fondo. Se deja reposar durante 1 minuto y 15 s y finalmente se pone en marcha la amasadora a velocidad rápida, durante 1 minuto.
- Se tiene perfectamente limpio y engrasado un molde triple de 4x 4x16 cm, cada compartimento de dicho molde. A continuación, se fija el molde en la máquina compactadora y se vierte el mortero en las 3 cavidades del molde, rellenando solo cada cavidad hasta la mitad. A continuación, y mediante vibrado se compacta el mortero a la vez que se homogeniza. Posteriormente se acaban de llenar las 3 cavidades del molde con mortero y se repite la operación de vibrado, eliminando con

una espátula el sobrante de material, dejando una superficie lisa y uniforme en cada una de las tres cavidades del molde. En Figuras 3.39, 3.40 y 3.41 se representa molde normalizado, operación de llenado y vibrado del 50% del llenado del molde y del 100% de llenado de los moldes.



Fig3.39 Molde normalizado. Fig.3.40 Molde al 50% de llenado, con y sin vibración.



Fig. 3.41. Molde al 100% de llenado, sin y con vibración.

d) Las probetas se conservan dentro del molde durante 24 horas en cámara a una temperatura de $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$, con una humedad relativa no menor del 90% y no debiendo durante ese tiempo estar expuestas a vibraciones o sacudidas que puedan alterar el valor de la resistencia.

e) A las 24 horas se desmoldean las probetas de cada una de las referencias ME-0; ME-5; ME-10; ME-15; ME20; ME-25; ME-50 y ME-75; obteniéndose 3 probetas de cada referencia de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$.

f) Una vez que las probetas se desmoldean, son referenciadas convenientemente y se sumergen en agua potable, hasta el momento de su rotura, a temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$; evitando el contacto entre ellas y apoyándolas sobre una rejilla para su curado, el cual será de 7 días para los primeros ensayos de rotura y de 28 días para los segundos ensayos de rotura. En Figura 3.42 se observa la conservación de las probetas en agua.



Fig. 3.42 Probetas conservadas en agua para su curado.

3.5.1.2 Ensayos de morteros convencionales en estado endurecido.

Estos ensayos son destructivos ED de rotura a flexión y compresión y se realizan pasados 7 y 28 días de curado. Los ensayos a 7 días se realizan con solo 1 probeta de las tres de cada referencia, dejando las otras dos probetas de cada referencia para los ensayos a 28 días.

Los ensayos de flexión se realizan sobre la probeta completa de 40x40x160 mm y los ensayos de compresión se realizan con cada una de las dos mitades obtenidas en la rotura a flexión; realizando una media del valor de rotura a compresión, para obtener el valor definitivo de cada probeta; rechazando los valores que difieran más del 15% de ese valor medio, expresando el resultado por el valor medio de los valores aceptados.

Los ensayos mecánicos de rotura a flexión y compresión se realizan de acuerdo con la norma UNE-EN 1015- 11.

Para ambos ensayos; se han utilizado prensa hidráulica con una capacidad de carga de 10 tn de la marca ZWICK- ROELL Z-100 y prensa servohidráulica de la marca INSTRON de 200 kN de capacidad de carga. Ambas están conectadas a sus correspondientes equipos informáticos, los cuales transmiten las correspondientes órdenes establecidas para la realización del ensayo. En Figuras 3.43 y 3.44 se muestran fotografías de ambas prensas, ubicadas en LADICIM.



Fig. 3.43 Prensa ZWICK- ROELL Z- 100.



Fig. 3.44 Prensa INSTRON.

Resistencia a flexión; para su determinación se utiliza un sistema de carga concentrada en el centro de la probeta. Para la realización del ensayo, es necesario un utillaje, compuesto de dos cilindros de apoyo de acero, distantes entre sí $100 \text{ mm} \pm 0,5$ y otro equidistante de los anteriores. Figura 3.45.

La probeta de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$; se coloca apoyándola por una de las caras laterales de moldeo, sobre la bancada donde están los dos cilindros, quedando su eje longitudinal en posición normal con relación a dichos cilindros. La carga es aplicada verticalmente por medio del tercer cilindro, sobre la cara lateral opuesta. La prensa es calibrada con una precarga de 5 N y la velocidad de aproximación durante el ensayo es de 0,05 mm/s.

En Figuras 3.45 y 3.46 se muestran fotografías del útil de ensayo y de la prensa con la probeta colocada en el útil.



Fig. 3.42 Utillaje ensayo de flexión.



Fig.3.43 Prensa con probeta y útil de ensayo

Los resultados se expresan en N/mm^2 , mediante la aplicación de la siguiente fórmula matemática:

$$R_f = 1,5 \times F_f \times L / b^3 \quad \text{donde:}$$

b es el lado de la sección cuadrada del prisma en mm (40 mm).

F_f es la carga aplicada en el centro del prisma en la rotura (N o kN).

L es la distancia entre los apoyos del útil de ensayo (100 mm).

Resistencia a compresión; se efectúa sobre las dos caras laterales de moldeo de cada una de las dos mitades del prisma roto en el ensayo de flexión, de cada referencia. Los ensayos se realizan en la misma prensa que se ha utilizado para los ensayos a flexión.

Para la realización del ensayo, es necesario un utillaje, donde se colocan las muestras a ensayar. Cada muestra se debe centrada lateralmente, con relación a los platos del utillaje y longitudinalmente de modo que el extremo del prisma quede sin apoyar en el plato superior unos 10 mm. Figura 3.47.

El eje de la prensa debe coincidir con la parte superior del pistón del utillaje, sobre el cual ejercemos la carga de compresión hasta la rotura de las muestras.

La prensa se calibra con una precarga de 10 N y la velocidad de ensayo se establece en 0,1 mm/s. Figura 3.48.



Fig.3.47 Útil para ensayo a compresión.



Fig. 3.48 Ensayo a compresión.

Los resultados se expresan en N/mm^2 , mediante la aplicación de la siguiente fórmula matemática:

$$R_c = F_c / b^2 \quad \text{donde:}$$

F_c es la carga aplicada hasta la rotura a compresión (N o kN).

b es el lado de la sección cuadrada del prisma (40mm)

Todos estos ensayos; de flexión y compresión se han realizado sobre cada una de las muestras de mortero convencional con residuo cerámico como reemplazo de cemento Portland, en estado de endurecimiento a los 7 y 28 días. En Tabla 33, se indican el número de ensayos realizados y las prensas utilizadas.

Tabla 33. Estadillo de ensayos de morteros convencionales realizados a flexión y compresión y prensas donde se han realizado.

Muestra	Ensayos de rotura a flexión 7 días	Ensayos de rotura a compresión 7 días	Ensayos de rotura a flexión 28 días	Ensayos de rotura a compresión 28 días	Prensa utilizada
ME-0	1	2	2	4	ZWICK-ROELL
ME-5	1	2	2	4	INSTRON
ME-10	1	2	2	4	INSTRON
ME-15	1	2	2	4	INSTRON
ME-20	1	2	2	4	INSTRON
ME-25	1	2	2	4	ZWICK-ROELL
ME-50	1	2	2	4	ZWICK-ROELL
ME-75	1	2	2	4	ZWICK-ROELL
TOTAL	8	16	16	32	

3.5.2 Morteros autonivelantes y su dosificación

El mortero autonivelante es un mortero especial, bastante líquido, utilizado como base de diversos tipos de suelos, tarimas flotantes, etc. Este tipo de morteros se componen básicamente de cemento Portland, arena de sílice, arena fina caliza o filler con tamaño de grano $< 100 \mu\text{m}$, agua y aditivos.

En estos morteros autonivelantes, se va a utilizar el residuo cerámico polvo como reemplazo de filler calizo, mediante sustituciones parciales o totales de dicho filler al 25%; 50% y 100%. Los materiales utilizados para la dosificación de estos morteros autonivelantes son los siguientes:

- . Cemento CEM I 52,5 R.
- . Arena de sílice con grano máximo de 2 mm $d = 2,63 \text{ g/cm}^3$ y humedad = 0,35 %.
- . Filler calizo $< 100 \mu\text{m}$ $d = 2,72 \text{ g/cm}^3$ y humedad = 1,25 %.
- . Residuo esmalte cerámico en polvo $d = 2,63 \text{ g/cm}^3$ y humedad = 0,71 %.
- . Agua potable.
- . Aditivo superplastificante Máster Ease 5025 $d = 1,1 \text{ g/cm}^3$.

Como un principio de dosificación se utilizarán las siguientes premisas:

$$\text{Cemento} + \text{Filler} = 600 \text{ kg} / \text{m}^3.$$

$$\text{Superplastificante} = 1,5 \% \text{ en peso del cemento.}$$

$$\text{Fluidez del amasado medida en torta de escurrimiento} = 250 - 300 \text{ mm.}$$

Como primer paso para la dosificación definitiva con el residuo cerámico polvo; se trabaja con 0 % de residuo cerámico polvo y con las cantidades de producto expuestas en Tabla 34; con tres dosificaciones distintas hasta conseguir un escurrimiento adecuado.

Tabla 34 Primera dosificación mortero autonivelante sin residuo cerámico polvo.

Producto	Dosificación 1 g	Dosificación 2 g	Dosificación 3 g
Cemento CEM I 52,5 R	503,1	503,1	503,1
Agua	245,1	245,1	358,1
Arena sílice grano máximo 2 mm	1432,6	1432,6	1432,6
Filler calizo < 100µm	96,1	300	500
Aditivo	7,5	7,5	7,5
Torta de escurrido mm	150 mm	190 mm	260-270 mm
Añadir	203 g de filler calizo	200 g filler calizo 113 g de agua	Se da por buena dosificación
Cemento + Filler	600 kg/m ³	800 kg/ m ³	1003,1 kg/m ³

Una vez que se ha conseguido una amasada con 0 % de residuo cerámico polvo y con un parámetro de escurrimiento adecuado de 260 – 270 mm; se comienza a hacer nuevas dosificaciones, en base a la dosificación 3 de la Tabla 34, pero reemplazando el 25 %; 50 % y 100 % del filler calizo por residuo cerámico polvo y a la vez veremos los ajustes que se deben hacer en las dosificaciones hasta alcanzar parámetros de escurrimiento adecuados. En Tabla 35, se representan estas primeras dosificaciones de reemplazo del 25 %; 50 % y 100 %.

Tabla 35 Primeras dosificaciones con residuo polvo.

Reemplazos	0 %	25 %	50 %	100 %
Productos	kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³
CEM I 52,5 R	503,1	503,1	503,1	503,1
Agua	358,1	358,1	358,1	358,1
Arena sílice	1432,6	1432,6	1432,6	1432,6
Filler calizo	500	375	250	0,0
Filler residuo cerámico	0,0	125	250	500
Aditivo	7,5	7,5	7,5	7,5
Total	2801,3	2801,3	2801,3	2801,3
Añadir	0,0	16 g de agua	32 g de agua	63 g de agua
Cemento + finos kg /m³	1003,1	1003,1	1003,1	1003,1

Una vez dosificadas las cantidades de la Tabla 35; se comprueba que se debe añadir más agua en las dosificaciones del 25 %; 50 % Y 100 %; debido sin duda a que el filler de residuo cerámico polvo absorbe más agua que el filler calizo y dicha cantidad de agua aumenta a medida que aumentamos el reemplazo de filler calizo por filler de residuo cerámico polvo.

Con estas nuevas adiciones en las dosificaciones, se confecciona la Tabla 36; en base a las dosificaciones de la Tabla 35 más los añadidos de agua de dicha tabla.

Tabla 36 Dosificaciones definitivas con residuo cerámico polvo.

Reemplazos	0 %	25 %	50%	100%
Productos	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
CEM I 52,5 R	503,1	503,1	503,1	503,1
Agua	358,1	374,1	390,1	421,1
Arena sílice	1432,6	1432,6	1432,6	1432,6
Filler calizo	500	375	250	0,0
Filler residuo cerámico	0,0	125	250	100
Aditivo	7,5	7,5	7,5	7,5
Total	2801,3	2817,3	2833,3	2864,3

Con las cantidades de la Tabla 36, se hacen las amasadas correspondientes y se comprueban los escurrimientos, los cuales son correctos, Tabla 37.

Tabla 37 Dimensiones tortas de escurrimiento de las dosificaciones definitivas.

Dosificación	Ø Tortas en mm
0 %	260 – 270
25 %	310 – 300
50 %	300 – 295
100 %	240 - 250

3.5.2.1 Amasado y fabricación de probetas normalizadas de morteros autonivelantes

Para hacer las dosificaciones en peso de las mezclas correctamente, se ha utilizado una balanza de precisión en la que se han pesado los diferentes materiales a utilizar, siguiendo las pautas establecidas en Tabla 36.

Una vez pesados los diferentes materiales; se procede al amasado mediante una amasadora de morteros, siendo el procedimiento seguido, tanto para el amasado como para la posterior fabricación de las probetas normalizadas, el especificado en la norma UNE-EN 196-1 y los pasos seguidos han sido los siguientes:

a) Se vierte en la amasadora el agua, cemento, filler calizo < 100 μm y el filler cerámico polvo; dependiendo las cantidades de agua, filler calizo y filler cerámico polvo de las diferentes dosificaciones 0 %; 25 %; 50% y 100 %. En todas las dosificaciones permanece constante la cantidad de cemento CEM I 52,5 R (503,1 kg/m^3). Se pone en marcha la amasadora, a velocidad lenta, durante 30 s. A continuación, se vierten los 1432,6 kg/m^3 de arena de sílice de grano máximo 2 mm, volcándola repartida en 30 s. Seguidamente, se pone la velocidad rápida y se amasan otros 30 s.

b) Se para la amasadora y, durante 15 s, se separa el material adherido a las paredes laterales, empujándolo hacia el fondo. Se deja reposar durante 1 minuto y 15 s y finalmente se pone en marcha la amasadora a velocidad rápida, durante 1 minuto.

En Figura 3.49, se muestran dos dosificaciones recién amasadas; correspondientes a 0 % de residuo cerámico, solo con filler calizo y al 100 % de residuo cerámico polvo y sin filler calizo.



Fig. 3.49. Amasado con 0 % de residuo cerámico (izquierda) y con 100 % de residuo cerámico (derecha).

Una vez realizado el amasado y antes de moldear, es preciso realizar el ensayo de consistencia para ver la fluidez del mortero autonivelante amasado, que, en el caso de este tipo de morteros especiales, se definieron en 250 – 300 mm, medidos en $\varnothing$ de torta de escurrimiento.

Este ensayo se determina en la mesa de sacudidas de acuerdo con la norma UNE – EN 1015-3.

La consistencia adecuada, se va consiguiendo con las adiciones de más o menos agua, cantidades de filler calizo y filler residuo cerámico polvo como se ha visto en Tablas 35 y 36.

Los útiles necesarios para el ensayo son: soporte rígido con una leva para poder hacer los movimientos de sacudidas; una mesa circular plana sobre la que escurra el mortero amasado y molde en forma de cono en el cual se introduce la masa de mortero.

En Figura 3.50 se muestra la mesa de sacudidas y molde cónico utilizado en el ensayo



Fig. 3.50 Mesa de sacudidas y molde utilizado en el ensayo.

El método operatorio es el siguiente:

- . Se humedece ligeramente la mesa circular y el molde, teniendo la precaución que no quede agua.
- . El mortero autonivelante debe estar recién amasado.
- . Primeramente, rellenos la mitad del molde y mediante suaves golpes compactamos. En el caso de los amasados realizados, no hace falta compactar debido a su fluidez. Posteriormente se rellena la otra mitad del molde y se enrasa el material sobrante.
- . Posteriormente se desmoldea, quedándonos una especie de “flan” de mortero autonivelante que se extiende por la mesa circular. En las dosificaciones que se han realizado, no ha hecho falta realizar las 15 sacudidas ya que el amasado se extiende solo y con facilidad. La medición se realiza; sobre la extensión de las tortas formadas en la mesa circular, con la ayuda de un metro o calibre.

En Figura 3.51, se muestran las mediciones realizadas a las tortas de 25 % y 50 % de residuo polvo cerámico.



Fig. 3.51 Torta 25 % residuo cerámico 310- 300 mm (izquierda) y de 50 % residuo cerámico 300 – 295 mm (derecha).

Las dimensiones de las tortas de escurrimiento se reflejan en la Tabla 37, correspondientes a las dosificaciones 0 %; 25 %; 50 % y 100 %.

Una vez que se han realizado los ensayos de consistencia, seguimos con el procedimiento de la norma Une – EN 196-1 para la obtención de las probetas de ensayo normalizadas.

c) Se tiene bien limpio y engrasado un molde triple de 40 x 40 x 160 mm, cada compartimento del molde. Figura 3.39. Se fija molde a máquina compactadora y se vierte el mortero autonivelante recién amasado en las tres cavidades del molde. En el caso de las dosificaciones que se han realizado, no ha sido necesario compactar por vibración ya que, con la fluidez de los morteros preparados, por sí mismos rellenan el molde sin necesidad de compactar.

En Figura 3.52 se muestran los morteros autonivelantes en el molde, correspondientes a las dosificaciones 25 %; 50 % y 100 % de residuo cerámico polvo



Fig. 3.52 Moldeado de las dosificaciones 25 %; 50 % y 100 % de residuo cerámico.

d) Las probetas se conservan dentro del molde 24 horas, en cámara a una temperatura de $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$, con una humedad relativa no menos del 90 % y no debiendo durante ese

tiempo estar expuestas a vibraciones o sacudidas que puedan alterar el valor de la resistencia.

e) A las 24 horas se desmoldean las probetas de cada referencia 0 %; 25 %; 50 % y 100 %; obteniéndose 3 probetas de cada referencia de 40 x 40 x 160 mm³. Ver Figura 3.52.



Fig. 3.52 Probetas desmoldeadas 0 % residuo cerámico (derecha) y 25 %; 50 % y 100 % de residuo cerámico (izquierda).

f) Una vez desmoldeadas las probetas, se sumergen en agua potable, hasta su rotura, a temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$; evitando el contacto entre ellas y apoyándolas en una rejilla para su curado, el cual será de 7 días para los primeros ensayos de rotura y de 28 días para los segundos ensayos de rotura. En Figura 3.42 se puede observar la conservación de las probetas en agua.

3.6.- Hormigones autocompactantes HAC

El hormigón autocompactante (HAC) es un hormigón muy fluido que tiene la capacidad de rellenar perfectamente los encofrados por la acción de su propio peso y compactarse sin la necesidad de la aplicación de energía externa. Desde la colocación hasta el endurecimiento, el HAC debe mantener una composición obtenida con una pasta de viscosidad moderada, garantizando su fluidez y manteniendo la cohesión adecuada, evitando la separación de los componentes (30).

Este tipo de hormigón presenta muchas ventajas ya que no requieren métodos de compactación tradicionales para su consolidación, reduce el número de operarios, los costes energéticos, la contaminación acústica asociada a la compactación con medios neumáticos, facilidad de colocación por gravedad o bombeo, mejora el encapsulado de armaduras, gran capacidad de relleno de moldes con geometrías complicadas.

En estado endurecido, el HAC se caracteriza por tener mejores propiedades mecánicas, de durabilidad y mejor acabado superficial (30).

3.6.1. Introducción

En líneas generales, el HAC se diferencia de un hormigón vibrado convencional, por tener menor contenido de árido grueso y menor tamaño máximo de árido, mayor volumen de finos $\leq 125 \mu\text{m}$ y el uso de aditivos plastificantes. En este capítulo, se describen los materiales empleados en la fabricación de las mezclas de los HAC; así como también los procedimientos experimentales realizados sobre los componentes de forma individual y, posteriormente, sobre las mezclas, tanto en estado fresco como endurecido. Los resultados de todos los ensayos realizados se presentan en el Capítulo 4.

El trabajo experimental tiene como objetivo principal, la fabricación de HAC empleando residuos vitreos cerámicos en estado polvo como material de reemplazo de filler calizo en proporciones del 50% y del 100% y, comparando sus características con un HAC de control.

3.6.2. Materiales empleados

Para el trabajo experimental se han utilizado los siguientes materiales:

- . **Cemento Portland tipo CEM I 52,5 R** que corresponde a la mayor clase resistente de acuerdo con la Instrucción para recepción de Cementos RC-08; significando la R que es un cemento de fraguado acelerado que proporciona una alta resistencia inicial. Este tipo de cemento contiene una alta proporción de Clinker, en torno al 97% y un 4% de yeso. Su densidad es del 3 g/cm^3 y tiene una resistencia a compresión a la edad de 28 días $\geq 52,5 \text{ MPa}$.
- . **Grava caliza 4/16**, natural de machaqueo con tamaño de grano máximo de 16 mm.
- . **Arena caliza 0/4**, natural de machaqueo con tamaño máximo de grano de 4 mm.
- . **Arena silícea 0/1**; arena fina de SiO_2 con un tamaño máximo de grano de 1 mm.
- . **Filler calizo**, árido fino con un tamaño de partícula $< 100 \mu\text{m}$.
- . **Residuo de esmalte cerámico polvo**, con una densidad de $2,63 \text{ g/cm}^3$; este material se utilizará como árido fino, reemplazando al filler calizo en proporciones del 50% y 100%.
- . **Aditivo superplastificante de referencia Máster Ease 5025**. La densidad de este aditivo es de $1,1 \text{ g/cm}^3$ y su dosificación será del 1,5 al 2 % con relación al peso del cemento.

. **Agua potable**, libre de sustancias perjudiciales que puedan alterar las propiedades reológicas de las mezclas, procedente de la red existente en los laboratorios de LADICIM.

En Figuras 3.54 y 3.55 se representan los distintos materiales.

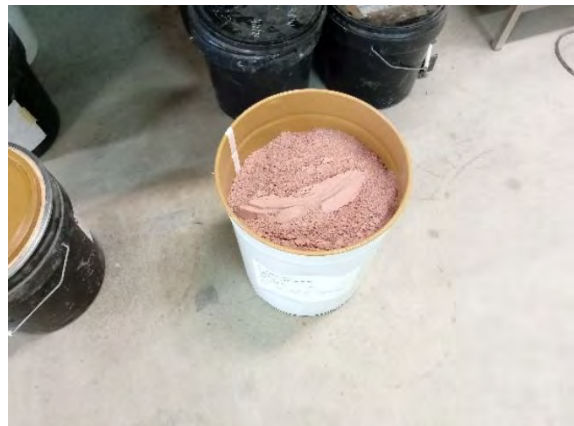
;



Fig. 3.54. Áridos. Superior izquierda grava 4/16; superior derecha arena caliza 0/4 e inferior derecha arena de sílice 0/1.



Cemento CEM I 52,5 R



Residuo cerámico polvo



Filler calizo



Aditivo plastificante

Fig.3.55. Cemento (superior izquierda), adiciones (residuo cerámico y filler calizo), aditivo (inferior derecha)

3.6.3. Caracterización de los materiales empleados en la fabricación de HAC

3.6.3.1. Caracterización química.

Se realizó Espectroscopia de Dispersión de Energías de Rayos X (EDX) y Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma de Microondas (AES) sobre el residuo cerámico, indicando la metodología utilizada y sus resultados en los puntos 3.4.1.1 y 3.4.1.2 de este Capítulo 3.

3.6.3.2. Caracterización física de los materiales

. **Determinación de la humedad.** Aunque en el punto 3.4.2.1 se determinó la humedad de todos los materiales empleados en las fabricaciones de morteros convencionales y

autonivelantes; para la fabricación de los HAC es necesario volver a determinar la humedad de los materiales ya que con el tiempo de almacenamiento es muy previsible que este parámetro de la humedad haya sufrido modificaciones. Este parámetro es importante; ya que el conocimiento del % de humedad, tanto en los áridos naturales como reciclados, son básicos para el diseño posterior de la dosificación tanto del HAC de referencia como para la fabricación con áridos finos de residuo cerámico utilizado como reemplazo del filler calizo.

El método operatorio de realización del ensayo es el descrito en el punto 3.4.2.1 de este capítulo. Los resultados obtenidos son los expuestos en la Tabla 38.

Tabla 38. Humedades de los materiales empleados en HAC.

Materiales	% humedad
Grava caliza 4/16	0,06
Arena caliza 0/4	0,15
Arena de sílice 0/1	0,23
Filler calizo	0,54
Residuo cerámico	0,68
Cemento	0,11

. **Determinación de la densidad de los materiales.** Las densidades se determinaron en el punto 3.4.2.2 de este Capítulo 3, utilizando el picnómetro de Le Chatelier; se resumen dichos parámetros en Tabla 39

Tabla 39. Densidades de los materiales utilizados.

Materiales	g/cm³
Grava caliza 4/16	2,66
Arena caliza 0/4	2,68
Arena de sílice 0/1	2,63
Filler calizo	2,72
Residuo cerámico	2,63
Cemento	3,00
Aditivo plastificante	1,11

. **Determinación de la finura de las adiciones finas (filler calizo y residuo cerámico).** Este ensayo consiste en la determinación de la superficie específica Blaine. Una vez conocida la densidad de las adiciones, se calcula la finura del árido fino mediante un permeabilímetro Blaine. Figura 3.56, siguiendo las instrucciones dadas en la norma UNE-EN 196-6.



Fig.3.56. Aparato de ensayo y celda metálica. Método Blaine. LADICIM.

El ensayo está basado en la resistencia que ofrece una capa compactada de material pulverulento al paso de aire a presión atmosférica, en condiciones de temperatura de laboratorio. El vacío se genera mediante una columna de aceite en el interior del tubo del permeabilímetro Blaine que se compensa con la permeabilidad de la muestra. La velocidad de desplazamiento de la columna de aceite permite determinar la superficie específica Blaine en cm^2/g .

Para obtener la finura del filler calizo se toman de muestra 2,11 g y para el residuo cerámico se toman 2,04 g. Estas cantidades están calculadas en función de la densidad de estos materiales en las fichas adjuntas representadas en las Figuras 4.57 y 4.58. Una vez pesadas estas cantidades en balanza de precisión; se realiza el método operativo que se describe a continuación.

Se coloca el material a ensayar en la celda metálica, entre dos papeles de filtro circulares, para evitar pérdidas de material. Se cierra herméticamente el sistema y se hace vacío para llenar la columna de aceite por encima de la marca superior del tubo del equipo. A continuación, se abre el sistema, para que el aceite comience a fluir a través del material a ensayar a una velocidad que está vinculada a la velocidad de bajada de la columna de aceite. En el momento que el nivel superior de la columna de aceite se sitúa en la marca superior del tubo se comienza a tomar el tiempo con un

cronómetro. En cuanto el nivel de aceite alcanza la segunda marca del tubo, se detiene el cronómetro y se registra el tiempo transcurrido.

Para cada material se realizan tres mediciones de tiempos y para el cálculo se utiliza la media aritmética de las tres mediciones.

En Tabla 40 se representan los tiempos obtenidos en el ensayo y el resultado de superficie específica Blaine obtenida para el filler calizo y el residuo cerámico

Tabla 40. Tiempos y resultados de superficie específica Blaine.

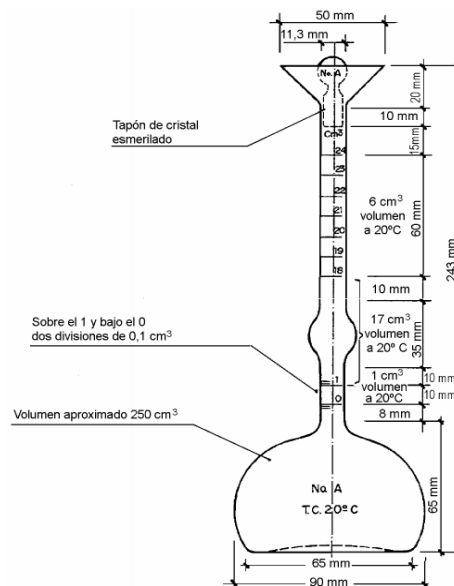
Material	Tiempo del ensayo Blaine en segundos	Superficie específica Blaine cm ² /g
Filler calizo $\leq 100 \mu\text{m}$	30 -29,9 -29,28	3675
Residuo cerámico polvo	59 - 58 -59	5320

Los resultados nos indican que la finura es mucho mayor en el residuo cerámico que en el filler calizo ya que los tiempos de paso de la columna de aceite son muy superiores y esto da origen a que la superficie específica Blaine sea mucho mayor, casi un 45% superior.

En Figuras 3.57 y 3.58, se presentan las fichas confeccionadas con la determinación de la densidad del residuo cerámico y el filler calizo, así como el cálculo realizado de la superficie específica Blaine en función de los tiempos registrados.

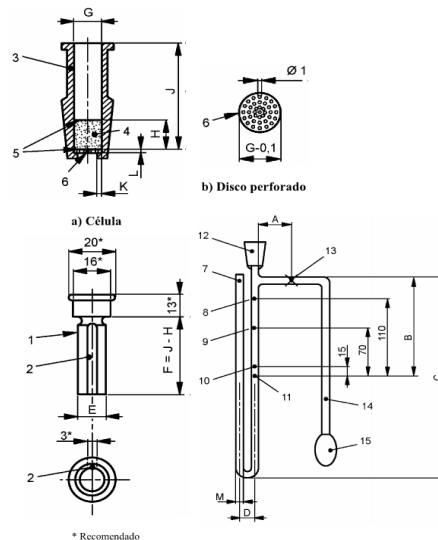
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD (PICNÓMETRO DE LE CHATELIER): UNE-EN 80103:2013

Vol. 2-Propanol (cm ³)		Masa inicial de Cem. (g)	
V ₀ =		m ₀ =	
Vol. 2-Propanol+Cem (cm ³)		Masa final de Cem. (g)	
V _T =		m _T =	
Vol. De Cemento (cm ³)		Masa de Cemento (g)	
V = V _T -V ₀ =	0	m = m ₀ -m _T =	0
Densidad (g/cm ³)		ρ = m/V=	2,630
Observaciones:			



DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE ESPECÍFICA DE BLAINE: UNE - EN 196-6:2010

Tª de ensayo (°C):		Viscosidad del aire (Pa·s):	
Tª =	21	$\mu =$	0,00001824
Porosidad empleada e		Constante del aparato	
e =	0,578	K =	23,69
Masa de Cemento (g) con porosidad e			
$m = 1.84 \cdot (1-e) \cdot \rho =$			2,042
Masa de Cemento (g) con porosidad e=0.5			
$m = 0.92 \cdot \rho =$			2,420
Tiempos de flujo de la columna de aceite (s)			
t ₁ =	t ₂ =	t ₃ =	t = ($\sum t_i / 3$) =
59	58	59	58,6666667
Superficie espec. Blaine (cm ² /g) con e =			0,578



Fecha de calibración: 10/07/2018

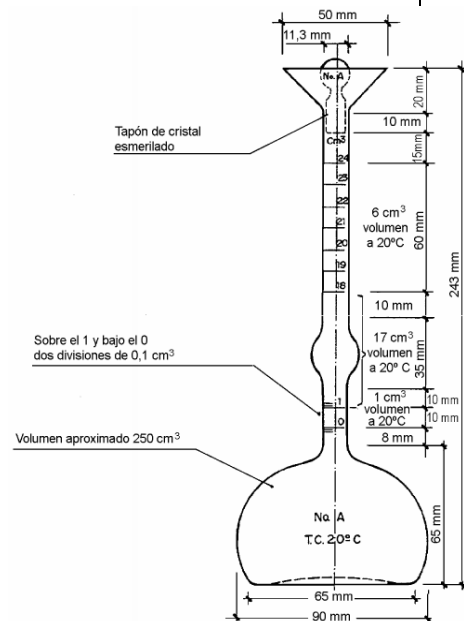
$$S = \frac{\sqrt{e^3} \cdot K \cdot \sqrt{t}}{\rho \cdot (1-e) \cdot \sqrt{0.1 \cdot \eta}}$$

5319,513

Fig. 3.57. Residuo cerámico

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD (PICNÓMETRO DE LE CHATELIER): UNE-EN 80103:2013

Vol. 2-Propanol (cm ³)		Masa inicial de Cem. (g)	
$V_0 =$		$m_0 =$	
Vol. 2-Propanol+Cem (cm ³)		Masa final de Cem. (g)	
$V_T =$		$m_T =$	
Vol. De Cemento (cm ³)		Masa de Cemento (g)	
$V = V_T - V_0 =$	0	$m = m_0 - m_T =$	0
Densidad (g/cm ³)		$\rho = m/V =$	2,720
Observaciones:			



DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE ESPECÍFICA DE BLAINE: UNE - EN 196-6:2010

Tª de ensayo (°C):		Viscosidad del aire (Pa·s):	
Tª =	18	$\mu =$	0,0000181
Porosidad empleada e		Constante del aparato	
e =	0,578	K =	23,69
Masa de Cemento (g) con porosidad e			
$m = 1.84 \cdot (1-e) \cdot \rho =$			2,112
Masa de Cemento (g) con porosidad e=0.5			
$m = 0.92 \cdot \rho =$			2,502
Tiempos de flujo de la columna de aceite (s)			
t ₁ =	t ₂ =	t ₃ =	t = ($\sum t_i / 3$) =
30	29,9	29,28	29,726667
Superficie espec. Blaine (cm²/g) con e =		0,578	

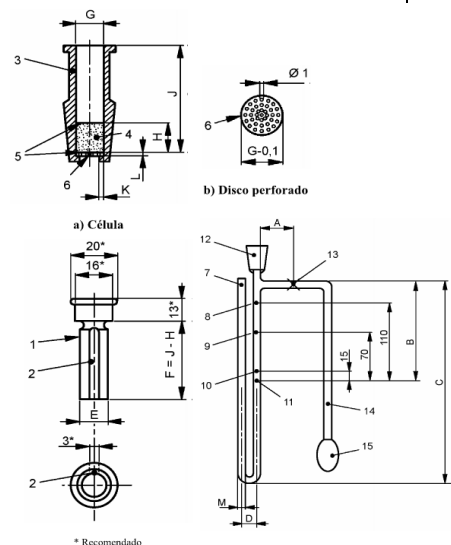


Fig. 3.58. Filler calizo

Fecha de calibración:	10/07/2018
$S = \frac{\sqrt{e^3} \cdot K \cdot \sqrt{t}}{\rho \cdot (1-e) \cdot \sqrt{0.1} \cdot \eta} =$	
3675,434	

3.6.3.3. Caracterización morfológica

Esta caracterización se realiza sobre las distintas fracciones de áridos que posteriormente utilizaremos en la confección del HAC de control; mediante la distribución granulométrica de estas diferentes fracciones.

Granulometría es la distribución por tamaños de partículas de un árido mediante la separación de estas partículas con tamices o cedazos. Estos tamices son útiles con marco metálico y con una malla en su interior en la que el árido quedara retenido en función de la luz de la malla (distancia entre hilos en mm).

La granulometría, se realiza según lo establecido en la norma UNE-EN 933 (49). En dicha norma, se establece la cantidad mínima de muestra en función del tamaño de partícula del árido Tabla 41.

Tabla 41. Cantidades de muestra a tomar

Tamaño máximo de árido en mm	Peso mínimo de muestra en kg
16	2,6
8	0,6
≤4	0,2

El método operatorio realizado ha sido el siguiente:

- . Se cuarteo mediante un rifle, la muestra de laboratorio hasta obtener una fracción completa cuyo peso mínimo, según el tamaño máximo del árido, sea el establecido en Tabla 41.
- . Las muestras obtenidas se introducen en estufa a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante.
- . Se toman una serie de tamices, comenzando por aquel cuya abertura coincida con el tamaño máximo del árido, de tal forma que sus respectivas aberturas sean acordes con las especificaciones del árido que se ensaya (45). Una serie de tamices habitualmente utilizada es la serie UNE con unas aberturas en mm de 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063 y fondo. En Figura 3.59 se representan algunos tamices de la serie UNE.



Fig. 3.59 Tamices de la serie UNE. LADICIM.

- . Se colocan los tamices uno encima del otro de menor a mayor abertura y de abajo hacia arriba, montando el conjunto sobre un fondo (45).
- . Se vierte el material sobre el tamiz superior, golpeando suavemente el conjunto para hacer que las partículas empiecen a bajar y quepa todo el árido sobre el tamiz superior, y se tapa el conjunto (45).
- . Se coloca la torre de tamices con su fondo y tapa en una tamizadora, se conecta el aparato a la red y se mantiene el movimiento de vaivén durante 1 minuto. En Figura 3.60 se representa tamizadora de vaivén utilizada en LADICIM para el análisis granulométrico.



Fig.3.60. Tamizadora de vaivén. LADICIM.

. Se pesan sobre un recipiente las cantidades retenidas en cada uno de los tamices, cuidando que todo el árido caiga dentro del recipiente (45).

. Se anotan los pesos obtenidos en cada uno de los tamices en la columna “peso retenido” en g y se realiza la suma de todas las cantidades retenidas, cuyo valor debe coincidir aproximadamente con el peso de la muestra ensayada (45).

. Se obtiene el % correspondiente a cada peso con respecto al peso total y se anotan como % “retenido”.

Para expresar el % de “pasante” se resta de 100 el valor en % del retenido acumulado en cada uno de los tamices.

. Posteriormente trasladamos datos de % de “pasante” y de tamaño de tamiz (mm) a eje de coordenadas para obtener la gráfica granulométrica correspondiente a cada material ensayado.

Una vez realizado todo el método operatorio; tanto para la arena de sílice 0/1 como para la arena caliza 0/4 y la grava caliza 4/16; los resultados obtenidos en cada caso se exponen a continuación.

. Arena de sílice 0/1 mm.

Muestra inicial = 642,8 g

En Tabla 42 se indican los resultados del tamizado en el análisis granulométrico y en Figura 3.61 se muestra la curva granulométrica correspondiente.

Tabla 42. Resultados arena de sílice 0/1 mm.

Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Pasante (%)	Retenido (%)
5	0,0	100	0,00
4	0,4	99,94	0,06
2,5	0,8	99,98	0,12
2	1,6	99,75	0,25
1,6	4,2	99,34	0,66
1,25	11,9	98,14	1,86
1	27,1	95,77	4,23
0,5	167,6	73,85	26,15
0,250	473,2	26,17	73,83
0,125	601,1	6,21	93,79
0,063	634,4	1,01	98,99
0,01	640,9	0,00	100

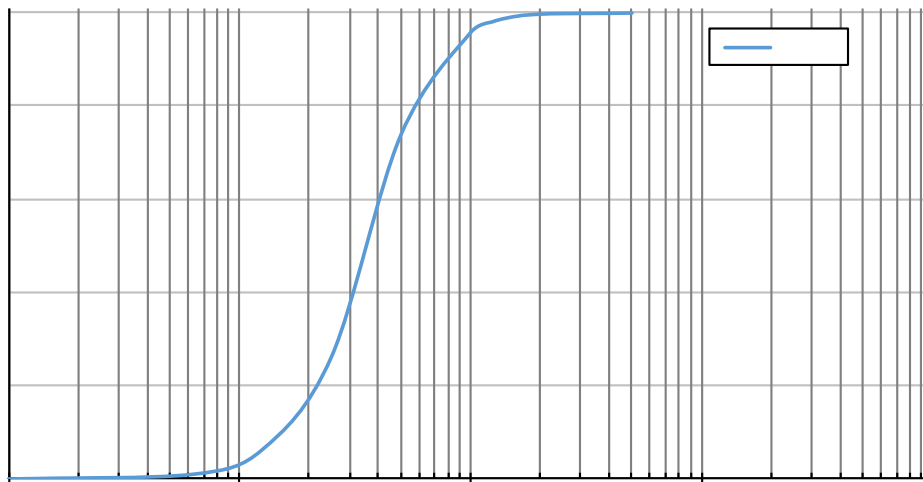


Fig. 3.61. Grafica granulométrica de arena de sílice 0/1 mm.

. Arena caliza 0/4 mm

Muestra inicial = 576,7g

En Tabla 43 se indican los resultados del tamizado y en Figura 3.62 se representa la curva granulométrica.

Tabla 43. Resultados de arena caliza 0/4mm.

Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Pasante (%)	Retenido (%)
8	0,0	100	0
4	0,4	100	0
2	186,1	68	32
1	341,8	40	60
0,5	432,6	25	75
0,25	484,5	16	84
0,125	519,5	9	91
0,063	554,7	3	97
0,01	573,4	0	100

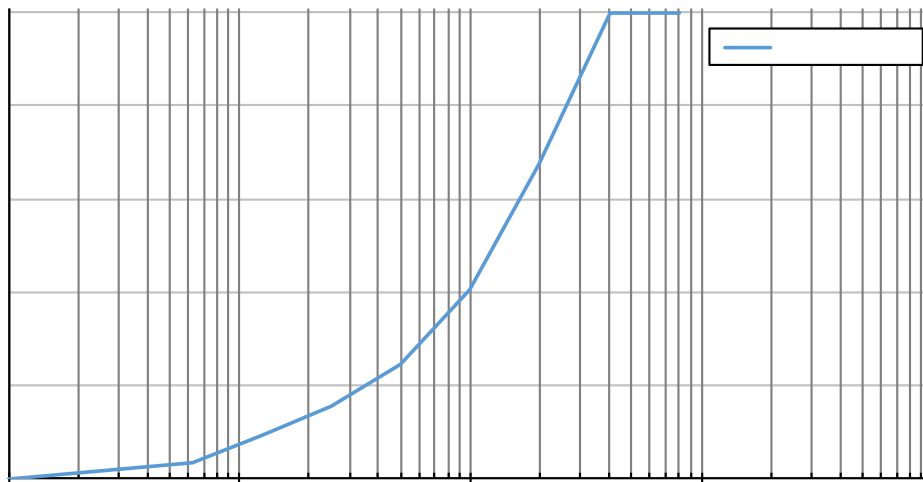


Fig. 3.62. Curva granulométrica de arena caliza 0/4mm.

. Grava caliza 4/16mm

Muestra inicial 542 g

En Tabla 44 se indican los resultados del tamizado y en Figura 3.63 se representa la curva granulométrica

Tabla 44. Resultados de la grava caliza 4/16 mm.

Tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Pasante (%)	Retenido (%)
100	0,0	100,00	0,00
12,5	0,0	100,00	0,00
11,2	4	99,26	0,74
10	23,5	95,64	4,36
8	149,5	72,36	27,64
6,3	344,4	36,16	63,84
5	457,2	15,25	84,75
4	470,1	12,86	87,14
2,5	476,2	11,73	88,27
2	479,2	11,18	88,82
1,6	484,5	10,19	89,81
1,25	490,1	9,16	90,84
1	499,6	7,40	92,60
0,5	507,6	5,91	94,09
0,25	536,2	0,61	95,66
0,125	536,2	0,61	99,39
0,063	538,9	0,11	99,89
F0ndo	539,5	0,00	100,00

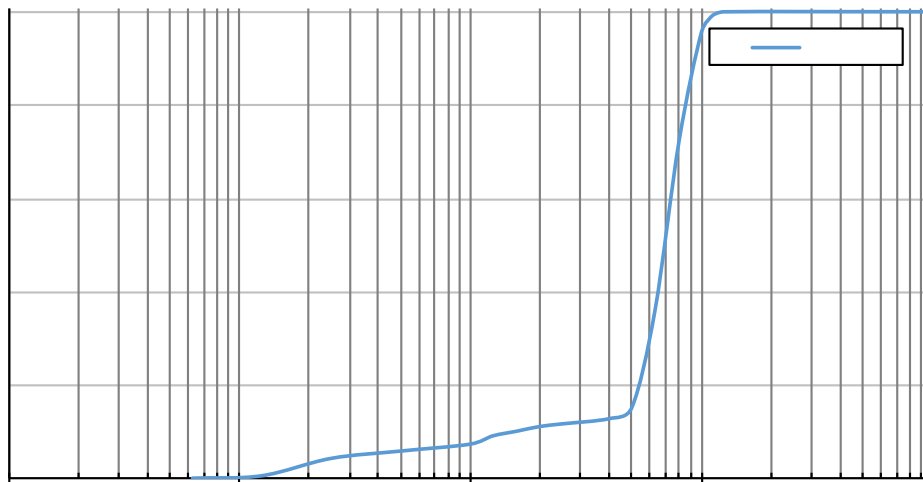
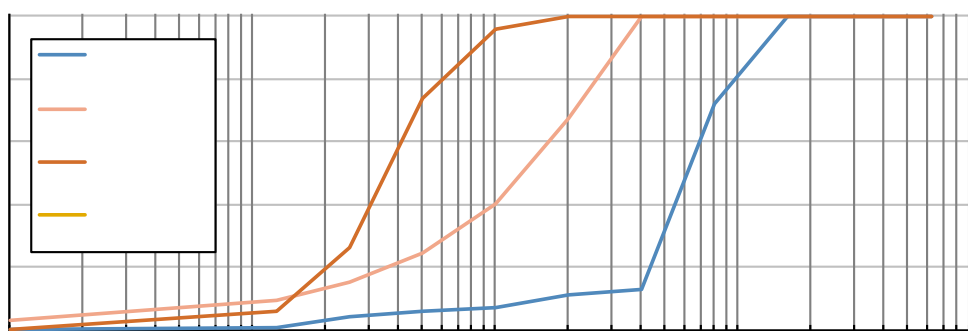


Fig. 3.63. Curva granulométrica grava 4/16 mm



En Figura 3.64 se representan las tres graficas en el mismo eje de coordenadas.

Fig. 3.64. Graficas granulométricas.

3.6.4. Dosificación de los HAC fabricados

El primer paso que realizar es la dosificación del HAC de control (en adelante HAC-C), el cual nos dará una pista sobre las dosificaciones a realizar en los HAC con reemplazos del 50% y del 100% del filler calizo por residuo cerámico. Estos HAC, los llamaremos en adelante HAC-R50 y HAC-R100.

El diseño del HAC de control HAC-C, se realiza utilizando como fracción gruesa, grava caliza 4/16 mm (en adelante GC) y como áridos finos arena caliza 0/4 mm (en adelante AC) y arena silíceas 0/1 mm (en adelante ASI). Para las adiciones se eligió filler calizo (en adelante FC) y como material cementante, cemento Portland CEM I 52,5 R. Como aditivo se utiliza un material plastificante Máster Ease 5025.

Se fijó la cantidad de cemento CEM I 52,5 R en 350 kg/m^3 ; el FC en 200 kg/m^3 y el aditivo plastificante en un 1,5 % en peso con relación al cemento. La cantidad de finos (Cemento + FC) se fija en 550 kg/m^3 .

La cantidad de agua se define teniendo en cuenta que la relación agua/finos esté comprendida entre 0,85-1,10 (en volumen); no obstante, esta proporción se modificará ligeramente si, tras el amasado del HAC-C, la mezcla presenta fluidez insuficiente o principio de segregación.

Una vez definidos los componentes de la pasta de hormigón por m^3 (cemento, adición, aditivo y agua) se procede a definir la distribución de los áridos en el volumen restante. De dicho volumen restante; el contenido de árido grueso GC se fija en un 63%, la AC en un 26% y la ASI en un 11%.

Las mezclas y sus dosificaciones; tanto en peso como en volumen, se presentan en el Capítulo 4

3.6.5. Fabricación del HAC. El amasado

La elaboración del HAC, se realiza de igual manera que la fabricación de un hormigón convencional; siendo el tiempo de amasado superior, con el objetivo de garantizar una completa distribución del aditivo en la mezcla y del agua con todos los componentes.

El mezclado del hormigón se realizó en hormigonera de tambor giratorio de 200 l y 100 l de capacidad, en función de los litros de carga de materiales. En Figura 3.65 se representan ambas amasadoras existentes en LADICIM.



Fig.3.65. Hormigoneras de 200 l (izquierda) y de 100 l (derecha). LADICIM.

Una vez que tenemos la dosificación calculada, son pesados todos los materiales por separado y se procede a mezclar el aditivo con una pequeña cantidad del agua de amasado; siendo el volumen de agua necesario 5 veces el volumen de aditivo.

Antes de añadir los materiales; se prepara la hormigonera, humedeciendo el interior de esta con agua mediante una manguera y procurando que no queden acumulaciones en el interior que puedan alterar la relación agua/cemento.

El cargado de los materiales en la hormigonera se hace siguiendo el siguiente orden: áridos gruesos de mayor a menor; adiciones compuestas de filler calizo o residuo cerámico polvo, y cemento. Una vez puesta en marcha la hormigonera y el cronometro; se comienza a añadir el agua de amasado cuyo proceso debe durar 20 segundos. Una vez añadido el agua y transcurrido 1 minuto, se incorpora el aditivo disuelto previamente en una parte del agua de amasado.

Amasamos durante 12 minutos sin interrupción y una vez llegado a este punto, el hormigón está listo para su caracterización en estado fresco y posterior fabricación de probetas.

3.6.6 Caracterización del HAC en estado fresco

Cuando disponemos de un hormigón en estado fresco, es cuando podemos distinguir un HAC de un hormigón convencional, para lo cual se emplean ensayos de caracterización que permiten evaluar las características de autocompactabilidad, las

cuales dependen de tres aspectos principalmente: la capacidad de flujo, la capacidad de paso y su estabilidad.

La caracterización del HAC en estado fresco, se realiza mediante los ensayos normalizados descritos en la norma UNE-EN 12350, distintos de un hormigón convencional, y en la norma UNE-EN 206-9 se recogen los rasgos recomendados para garantizar la autocompactabilidad y se tipifican dichos hormigones, según los resultados de los ensayos realizados.

Cuando se acaba el amasado, se procede a evaluar el comportamiento del HAC fabricado, realizando los siguientes ensayos normalizados: método de la caja en L, ensayo de embudo en V, ensayos de anillo japonés y ensayo de escurrimiento; según las normas que se indican en la Tabla 45

Tabla 45. Normativas de los ensayos de caracterización del HAC en estado fresco.

Ensayo	Norma
Caja en L	UNE-EN 12350-10
Embudo en V	UNE-EN-12350-9
Escurrecimiento con anillo japones	UNE-EN-12350-12
Escurrecimiento	UNE-EN-12350-8

3.6.6.1. Método de la caja en L

Este ensayo se realiza siguiendo las indicaciones de la norma *UNE-EN 12350-10: Ensayos de hormigón fresco. Parte 10: Hormigón autocompactante. Método de la caja en L* (41). El útil utilizado para este ensayo consiste en un molde metálico llamado caja en “L”. En Figura 3.66 se representa croquis dimensional y útil físico de caja en “L”. El útil dispone en la parte inferior del tramo vertical, de una compuerta deslizante y por delante de esta 2 o 3 barras de acero de 12 mm de diámetro; en nuestro útil utilizado en LADICIM dispone de 3 barras de acero.

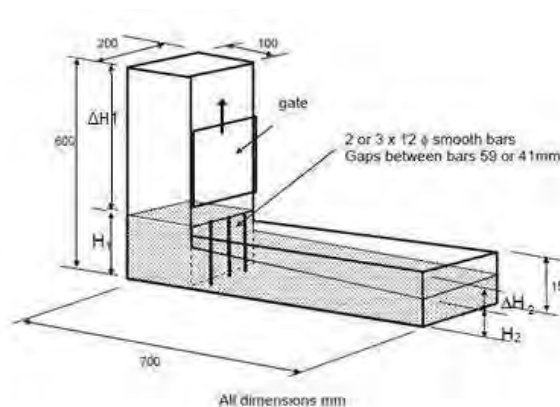


Fig.3.66. Dimensiones y útil físico de caja en “L” existente en LADICIM.

El objetivo de este ensayo es la evaluación de la habilidad de paso del HAC a través de las armaduras y su estabilidad. El método operatorio del ensayo es el siguiente:

- . Colocar el molde sobre una superficie lisa, humedecer el interior del útil, eliminar el agua sobrante y cerrar la compuerta.
- . Se rellena el compartimento vertical con 12 l de hormigón fresco hasta enrase del tramo vertical en una sola operación y sin aplicar ningún método de compactación.
- . Se deja reposar el hormigón 1 minuto y seguidamente se abre la compuerta y se permite el flujo del HAC hasta el tramo horizontal.
- . Una vez que acaba el flujo del HAC, se mide la altura del hormigón en el tramo vertical H_1 y al final del tramo horizontal H_2 . Estas alturas las redondeamos al mm más próximo. El resultado del ensayo PL (passing ability) se determina con el cociente de H_2 y H_1 redondeando a la centésima más próxima

$$PL = H_2 / H_1$$

Según la norma UNE-EN- 206-9 (38), cuando el tamaño del árido es ≤ 20 mm, el ensayo se realiza con tres barras y el resultado de PL debe ser mínimo de 0,8 y se clasifica como AC- RB2.

Este ensayo también permite ver la estabilidad del HAC de forma visual. Cuando se acumulan agregados detrás de la rejilla de la armadura, se considera que se produce bloqueo. Cuando se vean granos del agregado grueso, distribuidos por la superficie del HAC a lo largo del hormigón depositado en la parte horizontal de la caja en “L” el HAC es estable o lo que es lo mismo es resistente a la segregación.

3.6.6.2. Ensayo del embudo en V

Este ensayo se realiza de acuerdo con la norma *UNE-EN 12350-9: Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo de embudo en V* (40). El objetivo de este ensayo del embudo en V, es evaluar la viscosidad y la capacidad de relleno de los moldes por la propia acción de la gravedad y su peso.

Para la realización del ensayo se utiliza un molde de acero en forma de V, representado en Figura 3.67

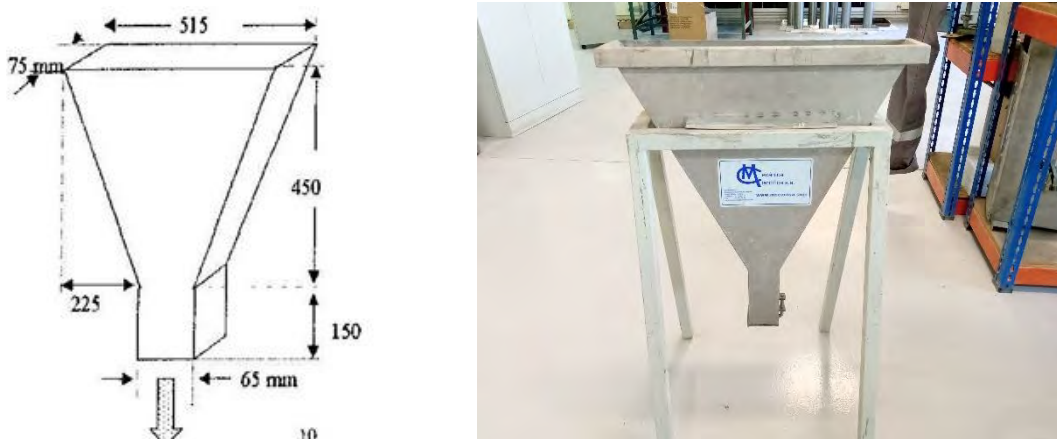


Fig.3.67. Dimensiones y útil físico de embudo en V existente en LADICIM.

El molde posee en la parte inferior una compuerta cuya abertura debe ser rápida. La operativa del ensayo consiste en:

- . Humedecer el interior del embudo y la compuerta, se cierra la compuerta y se llena el molde con 10,5 l de HAC fresco hasta enrase en parte superior del embudo.
- . Se mantiene en reposo 10 segundos y se abre la compuerta inferior, vaciando el hormigón al exterior.
- . El resultado del ensayo es el tiempo t_v que tarda en salir el volumen total de hormigón.

Según la norma UNE-EN 206-9 (38), los rangos admisibles de t_v se sitúan entre 4 y 20 segundos.

3.6.6.3. Ensayo de escurrimiento

Este ensayo evalúa la capacidad de relleno del HAC en ausencia de obstáculos. El ensayo se realiza de acuerdo con lo recogido en la norma *UNE-EN 12350-8: Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo de escurrimiento* (46).

Los materiales necesarios para la realización del ensayo son:

. Cono de Abrams, según la norma UNE-EN 12350-2.

. Placa de acero metálica de 2 mm de espesor y de 900 x 900 mm de dimensiones, existiendo tres círculos concéntricos grabados en la placa de 210, 300 y 500 mm de diámetro.

Ambos útiles se representan en Figura 3.68.



Fig.3.68. Cono de Abrams (izquierda) y placa de escurrimiento (derecha). LADICIM.

El método operatorio es el siguiente:

- . Se humedece la superficie interior del cono y la superficie de la placa.
- . Se coloca el cono haciendo coincidir la base con el círculo de 210 mm y se llena el cono con 5,5 l de HAC fresco, de una sola operación hasta enrasar, sin ningún tipo de compactación externa.
- . Se mantiene en reposo 30 segundos y a continuación se levanta el cono verticalmente de un solo movimiento.
- . Una vez que el HAC ha dejado de fluir, se determina el diámetro de mayor longitud (d_1) y el perpendicular a este diámetro (d_2); ambos redondeados a los 10 mm más próximos. El ensayo será válido siempre que la diferencia entre d_1 y d_2 sea inferior a 50 mm.

El resultado del ensayo SF (slump flow) se obtiene calculando la media aritmética de los dos diámetros, redondeando a los 10 mm más próximos.

$$SF = d_1 + d_2 / 2$$

También es calculado el tiempo en el que fluye el HAC hasta alcanzar la circunferencia de 500 mm. Este parámetro se define como t_{500} y permite evaluar la viscosidad del HAC y su velocidad de flujo.

Según la norma UNE-EN 206-9 (38) los parámetros admisibles para este ensayo se sitúan entre 550 y 850 mm de escurrido (SF) y el t_{500} debe ser $\leq$ a 8 segundos.

Según el parámetro SF, la norma UNE-EN 206-9 (38) clasifica al hormigón según lo recogido en la Tabla 46.

Tabla 46. Clasificación del HAC según escurrimiento. UNE-EN 206-9.

Clase	Escurrecimiento (mm)
AC - E1	$550 \leq SF \leq 650$
AC - E2	$650 \leq SF \leq 750$
AC - E3	$750 \leq SF \leq 850$

Según el t_{500} , la viscosidad del HAC se clasifica de acuerdo con la Tabla 47 siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 206-9.

Tabla 47. Clasificación del HAC según la viscosidad. UNE-EN 206-9.

Clase	Tiempo (s)
AC-V1	$5 \leq t_{500} \leq 8$
AC V2	$2 \leq t_{500} \leq 5$
AC-V3	$T_{500} \leq 2$

3.6.6.4. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés.

Con este ensayo se evalúa la resistencia de paso del HAC a través de las barras de la armadura, en condiciones de flujo libre.

El ensayo se realiza de acuerdo con lo recogido en la norma UNE-EN 12350-12: Ensayos de hormigón fresco. Parte 12: Hormigón autocompactante. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés (47). Este ensayo viene complementado con el ensayo de escurrimiento comentado en el punto 3.6.6.3

Los materiales necesarios Para la realización del ensayo son los siguientes:

- . Cono de Abrams.
- . Placa de acero metálica de escurrimiento.
- . Anillo de acero de 30 cm de diámetro con 20 barras verticales de 10 mm. En Figura 3.69 se muestra anillo japonés y disposición del anillo y cono de Abrams en placa de escurrimiento para la realización del ensayo



Fig.3.69. Anillo japones y colocación de útiles para realización ensayo. LADICIM.

El método operatorio es el siguiente:

- . Se coloca el cono de Abrams, haciendo coincidir la base en la marca de 210 mm y se llena con 5,5 l de HAC fresco de una sola operación, hasta enrase y sin ningún tipo de compactación externa.
- . Se coloca el anillo metálico concéntricamente con el cono de Abrams.
- . Trascurridos 30 segundos; levantamos el cono de una sola vez y el HAC fluye y pasa por las barras.

Se mide el mayor diámetro del flujo expandido y se anota como d_1 (en mm), redondeando a los 10 mm más próximos. A continuación, se mide el diámetro del flujo en dirección perpendicular a d_1 y se anota como d_2 (en mm). El resultado de escurrimiento SF_J se calcula en función de la siguiente formula:

$$SF_J = d_1 + d_2 / 2$$

Seguidamente y con ayuda de una espátula de enrasar, se mide la diferencia de altura relativa entre el ángulo inferior de la barra y la superficie del hormigón en la parte central Δh_0 y en los cuatro puntos exteriores al anillo; dos Δh_{x1} , Δh_{x2} en el eje X y los otros dos en el eje Y; como se indica en Figura 3.70.

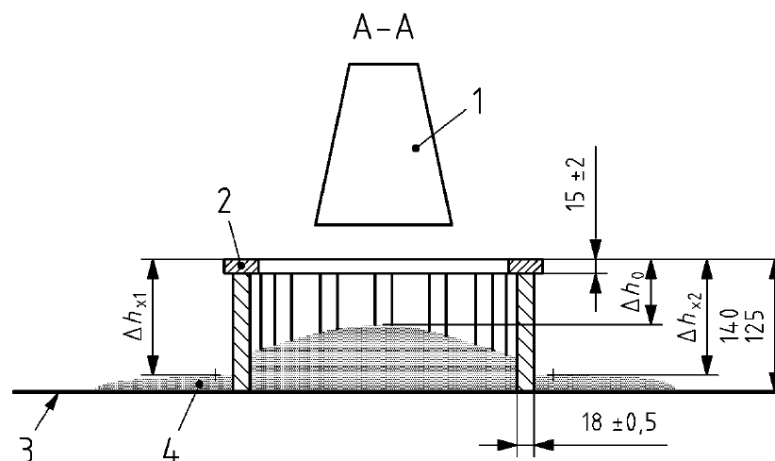


Fig. 3.70 Esquema alturas de anillo japonés. Fuente norma EN 12350-12. AENOR.

La capacidad de paso PJ se calcula con la siguiente fórmula matemática:

$$PJ = \Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2} / 4 - \Delta h_0$$

También se observa de forma visual en el hormigón extendido, signos de segregación y se toma el tiempo en que el hormigón alcanza cualquier punto del círculo de 500 mm; siendo este el parámetro t_{500} .

3.6.7. Hormigón en estado endurecido

En este apartado se describen los métodos de ensayo a realizar sobre los HAC fabricados, en estado endurecido, atendiendo a sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad.

3.6.7.1. Probetas

Para la realización de los ensayos, se fabrican 2 tipos de probetas y en todos los casos el llenado del molde se realiza de una sola operación.

Una vez llenos los moldes, se enrasan y dejan en reposo 24 horas. Pasado este tiempo, se desmoldean y se introducen en una cámara de humedad en condiciones de curado controladas $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y 99 % de humedad relativa.

Los dos tipos de probetas que se fabricarán serán las siguientes:

- . Probetas cúbicas de 100 mm de arista.
- . Probetas cilíndricas de 300 mm de alto y 150 mm de diámetro.

En Figura 3.71 se presentan los moldes para la fabricación de las probetas cúbicas o cilíndricas y probetas físicas recién fabricadas en estado fresco.



Fig.3.70. Moldes cubico y cilíndrico y probetas hormigón en estado fresco. LADICIM.

3.6.7.2. Caracterización física

A los 28 días de edad, se realizan las determinaciones de densidad, porosidad y absorción de las diversas combinaciones de los HAC fabricados. Todas las muestras de ensayo son obtenidas a partir de las probetas cilíndricas fabricadas con cada referencia de HAC.

El despiece de las probetas cilíndricas normalizadas de 150 mm de diámetro de base y 300 mm de altura se realiza mediante una cortadora con sierra de disco de diamante en húmedo, obteniéndose así, dos muestras de aproximadamente 90 mm de altura y una tercera de 100 mm, que corresponde en todos los casos, al tercio medio de la probeta. Previamente se realiza un corte de unos 10 mm de espesor en los extremos superior e inferior (30). En Figura 3.72 se representa un esquema de como cortar las probetas cilíndricas normalizadas.

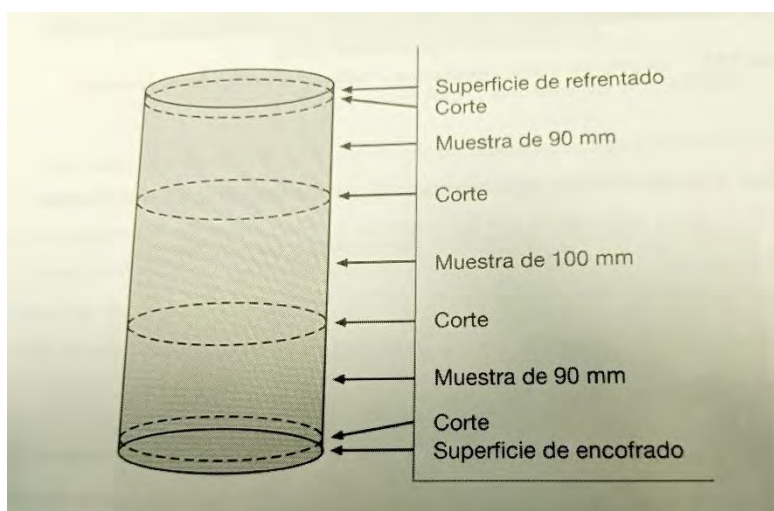


Fig.3.72. Esquema de corte de probetas cilíndricas. (Tesis Doctoral de Carlos Thomas García, 2012).

En Figura 3.73 se representa físicamente el despiece de probetas cilíndricas normalizadas de hormigón.



Fig. 3.73. Despiece de probetas cilíndricas normalizadas de hormigón. LADICIM.

. Determinación de la densidad del HAC

En primer lugar, se determina el volumen aparente, mediante balanza hidrostática con las muestras en condiciones de saturación.

Todos los tercios de la probeta cilíndrica se introducen en una celda de vacío durante 24 horas con objeto de extraer el aire. En las siguientes 24 horas se llenan los poros con agua mediante la sobrepresión creada por el vacío y en las últimas 24 horas en la celda, se mantienen sumergidas en agua a presión atmosférica.

Una vez que se ha finalizado la saturación de las muestras, se secan superficialmente para determinar el peso de muestra saturada seca (P_{SSS}).

A continuación, se sumergen en agua determinando, según el Principio de Arquímedes, el volumen aparente de las mismas (V_a). Para ello se han introducido las muestras en un cestillo, dentro de un recipiente lleno de agua, estando el recipiente sobre una báscula tarada con el cesto sumergido, antes de realizar la determinación.

Por último, se determina el peso seco (P_s) de las muestras, tras introducirlas en estufa a 110°C hasta peso constante. $d = P_s / V_a$

En Figura 3.74 se observa dispositivo para medir la densidad de los HAC fabricados.



Fig. 3.74. Medios utilizados para medir la densidad LADICIM.

3.6.7.3. Propiedades mecánicas

. Determinación de la resistencia a compresión uniaxial

Como su nombre indica este ensayo tiene por objeto determinar la resistencia a compresión de las probetas del HAC fabricadas. El ensayo se realiza sobre probetas de 28 días de edad.

La determinación se realiza siguiendo las indicaciones de la norma *UNE-EN 12390-3:2009: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas* (48).

Una vez fabricadas las probetas, se almacenan hasta el momento de hacer el ensayo, en cámara de humedad bajo condiciones óptimas de curado. Para este ensayo se fabricaron probetas cúbicas de 100 x 100 mm de arista.

Los ensayos de resistencia a compresión se realizan en prensa servohidráulica existente en LADICIM de 1500 kN de capacidad, marca SUZPECAR modelo CME 150/20.

En Figura 3.75 se representa la prensa utilizada en los ensayos de rotura a compresión de los HAC fabricados.



Fig. 3.75 Prensa marca SUZPECAR mod CME 150/20. LADICIM.

La resistencia a compresión del HAC de probetas cúbicas, f_c , se calcula a partir de la siguiente fórmula matemática:

$$F_c = F/S = F/L^2$$

F: Carga máxima, expresada en N, resistida por la probeta.

S: Superficie de aplicación de la carga en $\text{mm}^2 = 10.000 \text{ mm}^2$.

L: Lado, en mm, de la probeta = 100mm.

F_c : Resistencia a compresión expresada en MPa.

En Figura 3.76 se representa el aspecto que presenta la factura de una probeta cúbica tras el ensayo de la determinación de la resistencia a compresión.



Fig. 3.76. Probeta ensayada.

3.6.7.4 Durabilidad

La durabilidad de los HAC fabricados se han evaluado mediante los ensayos de:

- . Penetración de agua bajo presión.

- . Permeabilidad al Oxígeno.

. Ensayo de penetración de agua bajo presión

En los ensayos de penetración de agua bajo presión, se mantienen las probetas durante 72 horas sometidas a la actuación de una columna de agua, empujada a su vez por una columna de aire a una presión de 5 bar, equivalente a mantener una columna de agua de 50 mm de altura sobre las probetas, tal y como establece la norma UNE-EN 12390-8: 2009 *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión* (54).

Trascurrido ese tiempo, se retiran las probetas de los bancos de ensayo y se procede a romper las muestras mediante el método brasileño (tracción indirecta) para, de esta forma observar las dos caras de fractura y medir la profundidad de penetración del agua en el seno del hormigón. El registro de la carga de rotura de las probetas, además, da también una medida indirecta de la resistencia a tracción del HAC ensayado.

El dispositivo experimental consta de los siguientes elementos:

- . Dos anillos de goma para asegurar la estanqueidad.

- . Un cilindro o celda de metacrilato para albergar la columna de agua.

- . Una tapa superior por donde se introduce el agua y a través del cual se inyecta el aire a presión.

- . Un conducto de suministro de aire comprimido con regulador que permite ajustar la presión a distintos valores.

- . Una bancada soporte donde se montan los elementos, y es capaz de proporcionar una fuerza de apriete que garantice el mantenimiento de la estanqueidad del conjunto.

En Figura 3.77 se representa el dispositivo para la realización del ensayo, existente en LADICIM.

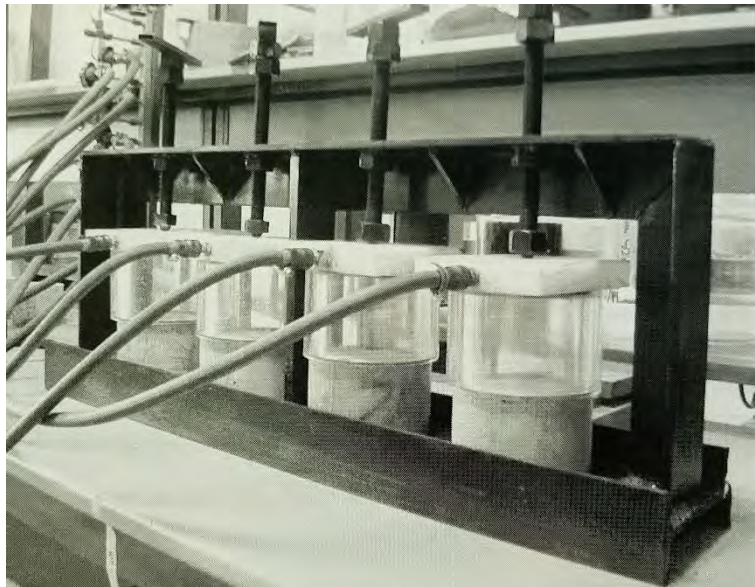


Fig. 3.77. Dispositivo experimental para ensayo. LADICIM.

Cumplidas 72 horas de ensayo, se desmonta el dispositivo y se procede a la rotura longitudinal de las probetas por el método brasileño, observándose el frente de penetración de agua, que es perfilado con ayuda de un rotulador indeleble como se muestra en la Figura 3.78. Las mediciones se realizan con la ayuda de un calibre y el resultado del ensayo se expresa como los valores de penetración máxima registradas en cada probeta



Fig.3.78 Detalle perfil de profundización del agua en los ensayos de penetración de agua bajo presión. (Tesis Doctoral Carlos Thomas García 2012).

. Ensayo de permeabilidad al oxígeno.

La permeabilidad al oxígeno del hormigón se ha obtenido de acuerdo con lo establecido en las normas *UNE-EN 83966:2008. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad* y *UNE- EN 83981. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido* (51) y (52).

El ensayo se basa en la capacidad que tienen los fluidos de poca densidad, y en particular los gases, para penetrar en el seno del material y circular por su interior, para ello, tanto la porosidad como la red capilar del mismo (50).

El fundamento del ensayo consiste en aplicar una presión constante de gas, oxígeno en este caso, sobre una de las caras de la probeta para, después de un tiempo suficiente como para que el gas atravesase toda la muestra y alcance la cara opuesta, registrar el caudal de gas a la salida (50).

Los caudales de gas a medir en el ensayo de permeabilidad al oxígeno sobre probetas de hormigón, son muy pequeños, del orden de 0,1 a 0,5 cm³/s y debido a ello, no pueden utilizarse caudalímetros convencionales y se recurre normalmente al método de la pompa de jabón para determinar el caudal a la salida de la muestra (50).

Para realizar el ensayo es necesario que las caras laterales de la probeta se encuentren perfectamente selladas, con el objetivo de que no escape gas a través de ellas y, así, todo el oxígeno que se aplica en una de las caras sea recogido en la cara opuesta.

El ensayo se lleva a cabo sobre las submuestras obtenidas tras el despiece por corte de las probetas cilíndricas normalizadas (3.6.7.2). Esto permite evaluar si existe alguna diferencia de la microestructura de la red capilar del hormigón según la posición en altura de cada submuestra (30).

Previo a la realización de los ensayos, las muestras se introducen en una estufa ventilada a 105°C ±5°C para eliminar cualquier tipo de humedad.

Para evitar el escape lateral del oxígeno a través de ella, se sella la superficie lateral de la submuestra con una fina capa de silicona, que, a su vez, favorece la estanqueidad radial entre la goma de caucho del dispositivo de ensayo y la probeta (30).

El dispositivo experimental utilizado para la realización del ensayo de permeabilidad al oxígeno sobre muestras de hormigón, consta de dos celdas cilíndricas metálicas provistas de un mecanizado interior de geometría troncocónica, en las que encaja una junta de caucho que alberga a la muestra a ensayar. En Figura 3.79 se muestra aparato de ensayo.

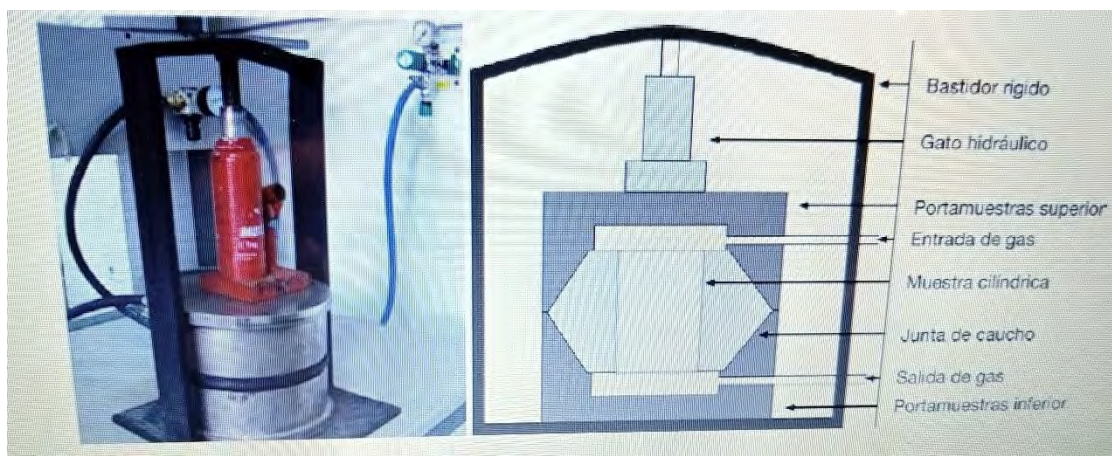


Fig. 3.79. Dispositivo montado (izquierda) y esquema del dispositivo experimental (derecha). (Tesis Doctoral Carlos Thomas García 2012).

El conector sellado del dispositivo se realiza al comprimir con un gato hidráulico las dos celdas enfrentadas, colocadas en un bastidor diseñado a tal efecto. Una salida/entrada lateral en las celdas permite introducir la presión del gas en la cara superior de la probeta y determinar el flujo de oxígeno en la cara inferior, mediante la utilización de un caudalímetro digital conectado a la salida. Patente de invención P201300197 (2012) de Carlos Thomas García, Juan Antonio Polanco Madrazo y Jesús Setién Marquín (53).

En Figura 3.80 se representa caudalímetro digital.



Fig. 3.80. Caudalímetro digital que determina el flujo de oxígeno a la salida de la muestra. (Patente de invención P201300197).

La entrada de gases al dispositivo se controla con un manómetro- regulador capaz de ajustar la presión de oxígeno aplicada con una precisión de 0,6% dentro del rango de presiones utilizadas en el ensayo (1 a 2 bar).

El coeficiente de permeabilidad a gases del material, conocido el caudal a la salida, se deduce a partir de la ecuación de Darcy (30) (50).

$$Q = K \times (P_2 - P_1 / L \mu) \times A$$

$$K = 2 P_1 R L \mu / A (P_2^2 - P_1^2)$$

Donde:

Q = Gasto, descarga o caudal (m³/s).

K = Coeficiente de permeabilidad (m²).

μ = Viscosidad del gas utilizado (N.s / m²).

L = Longitud de la muestra.

R = Caudal del gas a la salida de la muestra (m³/s).

A = Área de la sección transversal de la muestra (m²).

P₁= Presión absoluta a la salida de la muestra (N/m²).

P₂= Presión absoluta a la entrada de la muestra (N/m²).

La viscosidad del oxígeno en CN de presión y temperatura es igual a 2,02 x 10⁻⁵N. s / m² y, la presión a la salida es la presión atmosférica (1 bar), con lo que, sustituyendo en la fórmula de K y expresando la medida de presión en bares, la K resultante es la siguiente:

$$K = 4,04 \times 10^{-10} R L / A (P_2^2 - 1)$$

3.7. Utilización del residuo cerámico como materia prima en la fabricación de Clinker de cemento Portland

Uno de los objetivos de este trabajo de investigación era el tratamiento del residuo cerámico como reemplazo de cemento Portland en la fabricación de morteros convencionales; desarrollándose esta línea de investigación en el punto 3.5 de este Capítulo 3 y cuyos resultados se detallan en el punto 4.2 del Capítulo 4.

Otro de los objetivos era utilizar el residuo como materia prima para la fabricación de clinker de cemento Portland.

En la fabricación de clinker son utilizados como materia prima CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ como los óxidos fundamentales en la composición del crudo de cemento Portland, conteniendo menores cantidades de óxidos de Na, K, Mg, P y Ti. El porcentaje adecuado de todos estos óxidos fundamentales se obtiene a partir de la mezcla de materiales calizos, arcillosos y minerales de aluminio y /o hierro. Las rocas calizas son los materiales calizos utilizados en la fabricación del clinker como aporte de CO₃Ca al crudo, del cual posteriormente mediante calcinación (550-1100°C)

obtenemos el CaO. El material arcilloso utilizado es la base de SiO₂ al crudo. El residuo cerámico objeto de la investigación; en su caracterización química mediante Espectrometría de Dispersión de Energías de Rayos X EDX y reflejada dicha caracterización en el Capítulo 3, apartado 3.4.1; presenta bastante similitud con los óxidos fundamentales ya que posee óxidos de Na, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Fe y Mg.

Estos óxidos se componen mayoritariamente de SiO₂(54-59 %), seguido de los óxidos de Na₂O 7-11%), Al₂O₃(6-12%), K₂O (3-5%).

Para poder realizar los ensayos pertinentes para la reutilización del residuo cerámico como materia prima de fabricación de clinker; se habla con la empresa GRUPO DE CEMENTOS PORTLAND VALDERRIBAS y concretamente con la factoría ubicada en Mataporquera (Cantabria), con objeto de entregarles muestras del residuo para que evalúen si este residuo les sirve como materia prima. Los resultados de dicha evaluación son reflejados en el Capítulo 4.

Capítulo 4. Resultados experimentales obtenidos y análisis de dichos resultados

4.1 Introducción

En el Capítulo 3; se han visto los materiales empleados, la caracterización química y física del residuo cerámico, las diversas combinaciones realizadas con los materiales, así como las diversas técnicas analíticas y diversos procedimientos experimentales realizados sobre los materiales confeccionados.

4.2 Resultados de ensayos sobre morteros convencionales

En este punto se exponen los resultados obtenidos con las distintas combinaciones de reemplazo de cemento Portland por residuo cerámico; tanto en estado fresco como en estado endurecido.

4.2.1 Morteros convencionales en estado fresco

En este apartado, se pasa revisión al estado de las probetas de mortero convencional a las 24 horas del moldeo; es decir en el momento del desmoldeo.

Las probetas son referenciadas en función del % de residuo con relación al cemento; obteniéndose tres probetas de cada una de las referencias ME-0; ME-5; ME-10; ME-15; ME-20; ME-25; ME-50 y ME-75; de dimensiones 40x40x160 mm.

En las probetas desmoldeadas, se observan visualmente 2 cuestiones principalmente: variación de color y estado de dureza. En Tabla 48 se anotan las observaciones realizadas.

Tabla 48. Observaciones de los morteros convencionales con distintos reemplazos de cemento por residuo cerámico tras el desmoldeo a las 24 h.

Muestra	% en peso cemento/ residuo cerámico	Número de probetas de 40x40x160mm	Estado de endurecimiento a las 24 horas	Aspecto
ME-0	100/0	3	OK	Color cemento
ME-5	95/5	3	OK	Color cemento
ME-10	90/10	3	OK	Algo rojizo
ME-15	85/15	3	OK	+ rojizo
ME-20	80/20	3	OK	+ rojizo
ME-25	75/25	3	OK	+ rojizo
ME-50	50/50	3	Entra algo la uña en la superficie	+ rojizo
ME-75	25/75	3	Entra la una fácilmente en la superficie	Color muy rojizo

A la vista de la Tabla 48 observamos lo siguiente:

El color del mortero fabricado va progresivamente tomando el color rojizo del residuo cerámico, a medida que aumentamos la proporción en peso de reemplazo de residuo con relación al cemento. Figura 4.1; siendo mayor esta coloración en las referencias de las muestras ME-75; ME-50 y ME-25



Fig. 4.1 Variación de color de las muestras de mortero en función del % de residuo.

El fraguado; tras 24 horas, es deficiente en las muestras con mayor porcentaje de residuo cerámico; entrando la una en la ME-50 y con mucha facilidad en la ME-75. Esta cuestión no ocurre en el resto de las muestras. También las muestras ME-50 y ME-75; tienen un aspecto terroso, en comparación con otras muestras con menos % de residuo y que poseen un aspecto más vítreo. En Figura 4.2 se muestra esta diferencia de aspecto.



Fig. 4.2 Diferencia de ME-75 y ME-50 con ME-25.

4.2.2. Resultados de los ensayos realizados sobre morteros convencionales en estado endurecido

Se realizan los ensayos de carga de rotura a flexión y compresión, con una edad de las muestras de los morteros convencionales de 7 y 28 días de curado.

Los ensayos a 7 días se realizan con una sola probeta de ensayo de cada referencia, dejando las otras dos de cada referencia para los ensayos a 28 días.

Ambos ensayos; flexión y compresión, se realizan siguiendo la norma UNE-EN 1015-1. Asimismo, se han utilizado para la ejecución de los ensayos, prensa hidráulica ZWICK-ROELL Z-100 de 10 tn y prensa servo-hidráulica INSTRON de 200 kN de capacidad de carga. Figuras 3.43 y 3.44 del capítulo 3.

Durante los ensayos de rotura a flexión, las prensas se calibran con una precarga de 5N y una velocidad de aproximación de 0,05 m/s; parámetros que son cambiados durante el ensayo de rotura a compresión, los cuales serán de 10N de precarga y de 0,1 m/s de velocidad de aproximación.

En este apartado, reproducimos de nuevo la Tabla 33 en la que se indican los ensayos realizados.

Tabla 33. Estadillo de ensayos de morteros convencionales realizados a flexión y compresión y prensas donde se han realizado.

Muestra	Ensayos de rotura a flexión 7 días	Ensayos de rotura a compresión 7 días	Ensayos de rotura a flexión 28 días	Ensayos de rotura a compresión 28 días	Prensa utilizada
ME-0	1	2	2	4	ZWICK-ROELL
ME-5	1	2	2	4	INSTRON
ME-10	1	2	2	4	INSTRON
ME-15	1	2	2	4	INSTRON
ME-20	1	2	2	4	INSTRON
ME-25	1	2	2	4	ZWICK-ROELL
ME-50	1	2	2	4	ZWICK-ROELL
ME-75	1	2	2	4	ZWICK-ROELL
TOTAL	8	16	16	32	

Ensayos mecánicos de carga de rotura a flexión y compresión a 7 días

En Tablas 49 y 50 se expresan los resultados obtenidos, tanto a rotura a flexión como a compresión a los 7 días de curado de las probetas de muestra.

Tabla 49. Resultados de rotura a flexión a 7 días.

Muestra	Carga aplicada a rotura kN	Equivalencia en N	$R_f = 1,5 \times F_{cx} 100 / b^3$ N/mm ²	MPa
ME-0	3,920	3920	$1,5 \times 3920 \times 100 / 64000$	9,19
ME-5	2,57	2570	$1,5 \times 2570 \times 100 / 64000$	7,23
ME-10	2,02	2020	$1,5 \times 2020 \times 100 / 64000$	5,68
ME-15	1,97	1970	$1,5 \times 1970 \times 100 / 64000$	5,54
ME-20	1,70	1700	$1,5 \times 1700 \times 100 / 64000$	4,78
ME-25	2,63	2630	$1,5 \times 2630 \times 100 / 64000$	6,16
ME-50	1,52	1520	$1,5 \times 1520 \times 100 / 64000$	3,56
ME-75	0,586	586	$1,5 \times 586 \times 100 / 64000$	1,37

Tabla 50. Resultados de rotura a compresión 7 días.

Muestra	Carga aplicada a rotura kN	Media obtenida kN	Equivalencia N	$R_c = F_c / b^2$ N/mm ²	MPa
ME-0	53,30- 57,10	55,20	55200	55200/1600	41,40
ME-5	30,63-29,82	30,23	30230	30230/1600	22,67
ME-10	26,34-24,92	25,63	25630	25630/1600	19,22
ME-15	25,73-24,99	25,36	25360	25360/1600	17,05
ME-20	22,81-24,28	23,55	23550	23550/1600	17,66
ME-25	41,10-44,00	42,55	42550	42550/1600	26,59
ME-50	19,80-20,50	20,15	20150	20150/1600	12,59
ME-75	7,14-8,35	7,75	7750	7750/1600	4,84

A la vista de los resultados obtenidos, se ve claramente la tendencia de una disminución de las resistencias mecánicas, tanto a flexión como a compresión, a medida que se va aumentando el reemplazo de cemento Portland por residuo cerámico. Son totalmente anómalos los resultados obtenidos en la muestra ME-25, lo que induce a pensar que las pesadas de los productos para la realización de la amasada no han sido realizadas correctamente. El resto de los datos obtenidos, son totalmente lógicos e indicativos de que el residuo cerámico no tiene propiedades puzolánicas; no se produce ninguna reacción de hidratación en él, quedando totalmente inerte. Se verá en los datos a flexión y compresión a 28 días si se mantienen estas tendencias. También se ha observado que la muestra ME-75, durante el ensayo a flexión, tiene tendencia a la rotura como si se tratara de una arcilla, incluso parece que tiene algo de plasticidad. En las observaciones realizadas en estos morteros convencionales en estado fresco; ya se vio que en esta referencia entra la uña fácilmente.

En Figura 4.3 se representan estado de las muestras ME-0, ME-50 y ME-75 después de los ensayos a flexión y en Figura 4.4 se representan las muestras ME-0, ME-50 y ME-75 después de los ensayos a compresión; todos ellos a 7 días



Fig. 4.3. Rotura a flexión 7 días ME-0, ME-50 y ME-75.



Fig.4.4. Rotura a compresión 7 días ME-0; ME-50 y ME-75.

Ensayos mecánicos de carga de rotura a flexión y compresión a 28 días

Estos ensayos se realizan con dos probetas de cada una de las referencias. Se hacen dos ensayos de rotura a flexión de cada referencia y cuatro ensayos de rotura a compresión de cada referencia. Todos estos ensayos se realizan a los 28 días de curado de las muestras. Los resultados obtenidos se expresan en Tablas 51 y 52

Tabla 51. Resultados de rotura a flexión a los 28 días.

Muestra	Carga aplicada a rotura kN	Media obtenida kN	Equivalencia en N	$R_f = 1,5 \times F_{cx} \times 100 / 64000$ N/mm ²	MPa
ME-0	4,25-4,76	4,51	4510	$1,5 \times 4510 \times 100 / 64000$	10,57
ME-5	1,99-2,03	2,01	2010	$1,5 \times 2010 \times 100 / 64000$	5,65
ME-10	1,83-1,53	1,68	1680	$1,5 \times 1680 \times 100 / 64000$	4,72
ME-15	1,87-1,73	1,80	1800	$1,5 \times 1800 \times 100 / 64000$	5,07
ME-20	1,47-1,47	1,48	1480	$1,5 \times 1480 \times 100 / 64000$	4,15
ME-25	3,95-3,54	3,75	3750	$1,5 \times 3750 \times 100 / 64000$	8,78
ME-50	2,57-2,72	2,67	2670	$1,5 \times 2670 \times 100 / 64000$	6,26
ME-75	No se hizo ensayo	---	---	---	---

Al realizar los ensayos de rotura a flexión, con las muestras ME-75 (75% de residuo cerámico), se fracturaron ellas solas a causa de que eran muy arcillosas y por ello no hay resultados de rotura a flexión de dicha muestra. A pesar de ello, no es de importancia este dato, ya que los resultados que se hubieran obtenido serían de un valor realmente bajo.

Tabla 52. Resultados de rotura a compresión a los 28 días.

Muestra	Carga aplicada a rotura kN	Media obtenida kN	Equivalencia en N	$R_c = F_c/b^2$ N/mm ²	MPa
ME-0	69,5-70,46-69,7	69,89	69890	69890/1600	52,42
ME-5	49,05-55,24 50,98-51,56	51,71	51710	51710/1600	38,78
ME-10	43,25-44,66 45,46-43,97	44,34	44340	44340/1600	33,25
ME-15	32,63-28,65 42,82-43,71	39,72	39720	39720/1600	29,79
ME-20	24,98-35,17 28,81-38,62	31,75	31750	31750/1600	23,81
ME-25	57,46-48,97 40,21-53,93	50,14	50140	50140/1600	31,34
ME-50	38,89-36,92 37,48-38,73	38,01	38010	38010/1600	23,75
ME-75	9,35-9,08-8,84- 10,02	9,32	9320	9320/1600	5,83

A la vista de los resultados obtenidos a 7 y 28 días y para analizarlos con rigurosidad, se comparan con las muestras ME-0 (Portland sin residuo cerámico) y salvo en la muestra M-25; el resto de los parámetros nos indican una clara tendencia a la disminución de las resistencias mecánicas a medida que vamos aumentando los % de reemplazo de cemento Portland por residuo cerámico; disminuye la puzonalidad y el residuo cerámico sigue sin hidratarse; se comporta como un residuo inerte. En Figura 4.5 se muestra el estado de las muestras de todas las referencias tras el ensayo de rotura a compresión después de 28 días.



Fig.4.5. Rotura a compresión de todas las referencias a 28 días

En Tabla 53; se adjunta cuadro resumen con los resultados de los ensayos mecánicos y en Figuras 4.6 y 4.7 se representan las gráficas correspondientes a los valores de flexión y compresión a 7 y 28 días.

Tabla 53. Valores de ensayos de flexión y compresión a 7 y 28 días.

Reemplazo	Edad	Flexión (MPa)	Comp. (MPa)
0%	7 días	9,19	41,4
5%		7,23	22,67
10%		5,68	19,22
15%		5,54	17,05
20%		4,78	17,66
25%		6,16	26,59
50%		3,56	12,59
75%		1,37	4,84
0%	28 días	10,57	52,42
5%		5,65	38,78
10%		4,72	33,25
15%		5,07	29,79
20%		4,15	23,81
25%		8,78	31,34
50%		6,26	23,75
75%		0,00	5,83

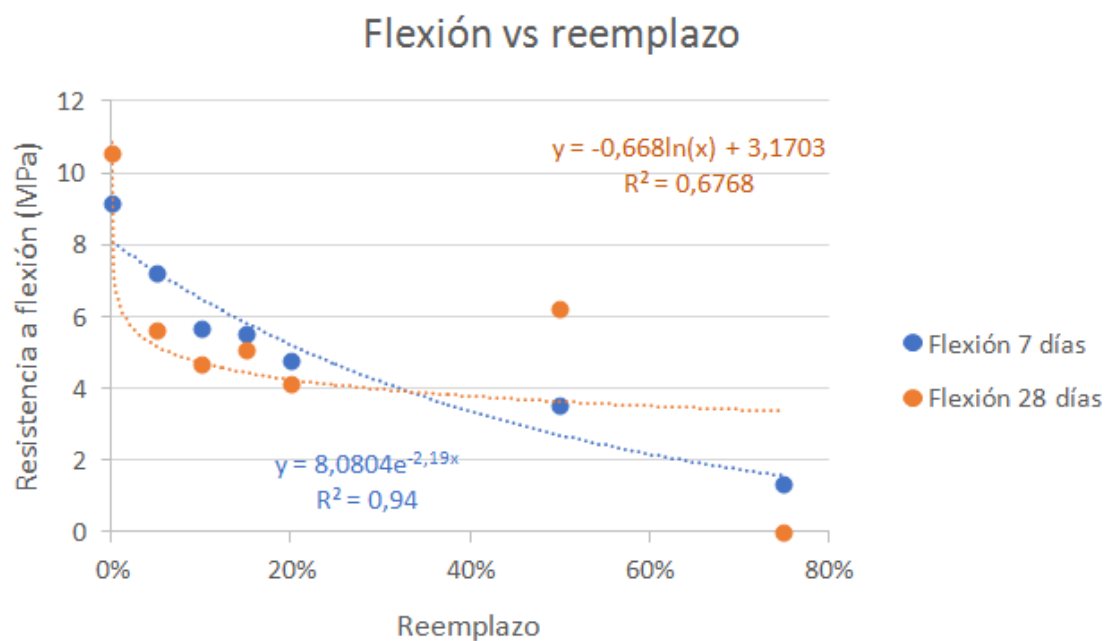


Fig. 4.6. Grafica de valores de flexión vs reemplazo.

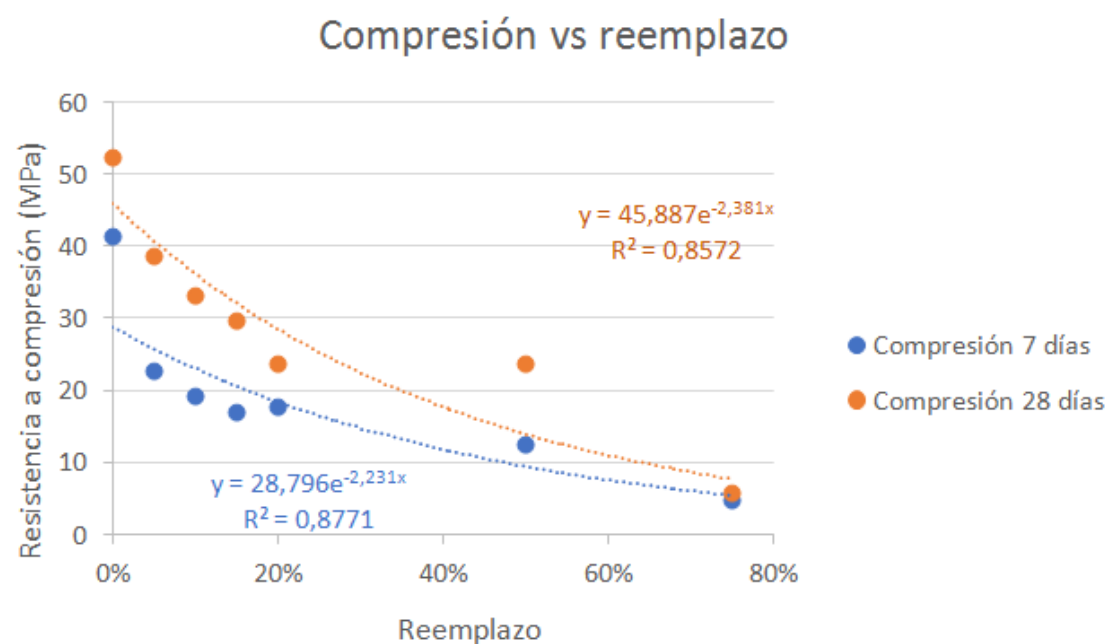


Fig.4.7. Gráfica de valores de compresión vs reemplazo.

Al realizar las gráficas, no se han tenido en cuenta los valores obtenidos con las muestras ME-25 (25% de residuo cerámico como reemplazo de cemento Portland) ya que sus resultados son totalmente anómalos en todos los ensayos mecánicos; tanto a 7 como a 28 días.

4.3. Resultados de ensayos sobre morteros autonivelantes

En este punto se exponen los resultados obtenidos; tanto en estado fresco como en estado endurecido, de las muestras fabricadas con cemento portland y empleando como reemplazo de filler calizo residuo cerámico.

4.3.1. Morteros autonivelantes en estado fresco

En este punto, se revisan el estado de las probetas de muestra a las 24 horas del moldeo; es decir durante el desmoldeo. Las probetas fabricadas han sido referenciadas con 0%; 25%; 50% y 100%, en función del % de residuo cerámico de reemplazo sobre el filler calizo. Todas las muestras tienen las mismas dimensiones de 40x 40x 160 mm.

En las probetas desmoldeadas, se observan visualmente tanto la variación de color como el estado de dureza de las muestras, cuyas observaciones se recogen en la Tabla 54.

Tabla 54. Observaciones de probetas desmoldeadas de morteros autonivelantes.

Muestra	% en peso filler calizo/residuo cerámico	Número de probetas de 40x40x160mm	Estado de dureza	Aspecto
0%	100/0	3	Muy bueno	Color grisáceo
25%	75/25	3	Muy bueno	Rojizo
50%	50/50	3	Muy bueno	+ Rojizo
100%	0/100	3	Muy bueno	+ Rojizo.

El estado de endurecimiento es muy bueno no apreciándose diferencia a medida que aumentamos el % de residuo cerámico. El color va variando a más rojizo (color del residuo cerámico) a medida que va aumentando el % de residuo cerámico con relación al filler calizo. En Figura 4.8 se puede apreciar estas diferencias de color.



Fig.4.8. Diferencias de color entre las referencias 0%; 25%; 50% y 100%.

4.3.2. Morteros autonivelantes en estado endurecido

Se realizan los ensayos de carga de rotura a flexión y compresión de las muestras de morteros autonivelantes a la edad de 7 y 28 días. Los ensayos a 7 días se realizan con una sola probeta de cada referencia; dejando las otras dos probetas de cada referencia para los ensayos a 28 días.

Ambos ensayos; flexión y compresión se realizan siguiendo la norma UNE-EN 1015-1, en prensa servo hidráulica INSTRON de 200 kN de capacidad de carga, Figura 3.44 del capítulo 3. La prensa se calibra con una precarga de 5 N y una velocidad de aproximación de 0,05 m/s en el ensayo de rotura a flexión, cambiando estos parámetros en la rotura a compresión a 10 N de precarga y una velocidad de aproximación de 0,1 m/s. En Tabla 55 se indican los ensayos realizados.

Tabla 55. Ensayos realizados

Muestra	Ensayos de rotura a flexión 7 días	Ensayos de rotura a compresión 7 días	Ensayos de rotura a flexión 28 días	Ensayos de rotura a compresión 28 días	Prensa
0 %	1	2	2	4	INSTRON
25%	1	2	2	4	INSTRON
50%	1	2	2	4	INSTRON
100%	1	2	2	4	INSTRON
Total	4	8	8	16	

Ensayos mecánicos de rotura a flexión y compresión a 7 días

En Tablas 56 y 57, se exponen los resultados obtenidos, tanto a rotura a flexión como a compresión a 7 días de las probetas de muestra.

Tabla 56. Resultados de rotura a flexión a los 7 días.

Muestra	Carga aplicada a rotura kN	Equivalencia N	$R_f = 1,5 \times F_c \times 100 / b^3$ N/mm ²	MPa
0 %	2,098	2098	$1,5 \times 2098 \times 100 / 64000$	4,91
25 %	2,78	2780	$1,5 \times 2780 \times 100 / 64000$	6,51
50 %	3,106	3106	$1,5 \times 3106 \times 100 / 64000$	7,28
100 %	3,020	3020	$1,5 \times 3020 \times 100 / 64000$	7,1

En Figura 4.9 se ven las probetas una vez que han sufrido la rotura a flexión; observándose en ellas que a medida que aumenta el % de residuo cerámico en sustitución de filler calizo, la sección es menos porosa y más compacta.



Fig. 4.9. Rotura a flexión 7 días.

En Tabla 56, también se observa que la resistencia de rotura a flexión aumenta a medida que aumentamos el residuo cerámico; siendo mayor dicha resistencia en las muestras del 50% y del 100 % de contenido de residuo cerámico.

Tabla 57. Resultados de rotura a compresión a los 7 días.

Muestra	Carga aplicada a rotura kN	Media obtenida kN	Equivalencia N	$R_c = F_c/b^2$ N/mm ²	MPa
0 %	27,57- 29,71	28,64	28640	28640/1600	17,90
25 %	39,21- 44,76	41,98	41980	41980/1600	26,24
50 %	47,46- 45,76	46,41	46410	46410/1600	29,13
100 %	43,99- 51,79	47,89	47890	47890/1600	29,93

En Figura 4.10 se observan estado de las muestras una vez realizado el ensayo de rotura a compresión.



Fig.4.10. Ensayos de rotura a compresión 7 días.

A la vista de los resultados obtenidos; tanto en flexión como en compresión, se observa una clara tendencia a mejorar las propiedades mecánicas a medida que aumentamos el % de residuo cerámico sustituyendo al filler calizo.

Ensayos mecánicos de rotura a flexión y compresión a 28 días

Estos ensayos se realizan con dos probetas de cada una de las referencias; haciendo dos ensayos de rotura a flexión y cuatro ensayos de rotura a compresión, de cada referencia.

Los ensayos son realizados a los 28 días de curado de las muestras; exponiendo los resultados en Tablas 58 y 59.

Tabla 58. Resultados de rotura a flexión a los 28 días.

Muestra	Carga aplicada a rotura kN	Media obtenida kN	Equivalencia N	$R_f=1,5 \times F_{cx} \times 100 / 64000$	MPa
0%	2,58-2,59	2,58	2580	$1,5 \times 2580 \times 100 / 64000$	6,04
25%	2,80*-3,57	3,19	3190	$1,5 \times 3190 \times 100 / 64000$	7,46
50%	4,51-4,87	4,69	4690	$1,5 \times 4690 \times 100 / 64000$	10,99
100%	5,04-4,87	4,95	4950	$1,5 \times 4950 \times 100 / 64000$	11,61

*En Figura 4.11, se representa sección de la rotura de esta probeta del 25% de residuo cerámico, en la cual se observa un resto de residuo vegetal procedente de la arena silíceas empleada en la elaboración de las muestras de morteros autonivelantes. Debido a esta impureza, se cree que la carga de rotura aplicada es algo menor (2,80 kN)



Fig.4.11. Sección de probeta de referencia 25% con impureza vegetal.

A pesar de esta anomalía; se observa una clara tendencia a soportar mayor carga de rotura a medida que aumenta el contenido de residuo cerámico. Tabla 59.

Tabla 59. Resultados de rotura a compresión a 28 días.

Muestra	Carga aplicada a rotura kN	Media obtenida kN	Equivalencia N	$R_c = F_c/b^2$ N/mm ²	MPa
0 %	32,64- 33,14 35,64- 36,20	34,38	34380	34380/1600	21,49
25 %	63,15- 54,96 64,29- 59,64	60,51	60510	60510/1600	37,81
50 %	74,54- 76,31 66,98- 73,47	72,83	72830	72830/1600	45,51
100 %	80,08- 78,85 76,00- 70,71	76,41	76410	76410/1600	47,75

En Figura 4.12 se representan estado de las muestras una vez que se han realizado los ensayos de rotura a compresión



Fig.4.12. Probetas de rotura a compresión a 28 días. 0% (izquierda) y 25, 50 y 100 % (derecha).

Durante los ensayos de rotura a compresión se observa lo siguiente: en el mortero 0% de residuo cerámico, los ensayos han dado un prisma completo o dos medias pirámides unidas por el vértice; sin embargo, en las muestras de 25%; 50% y 100%, las pirámides siempre se rompieron por el vértice de unión. Ver Figura 4.12. El aspecto de las muestras rotas es que parecen más compactas.

Independientemente de esta cuestión, la tendencia sigue siendo la misma, es decir aumentar la carga de rotura a medida que aumentamos la cantidad de residuo cerámico en sustitución de filler calizo.

En Tabla 60 se expone un cuadro resumen con los resultados de los ensayos mecánicos y en Figuras 4.13 y 4.14; se representan las gráficas correspondientes a los valores obtenidos en los ensayos de flexión y compresión

Tabla 60. Cuadro resumen de resultados de ensayos mecánicos a 7 y 28 días

Reemplazo	Edad	Flexión (Mpa)	Compresión (Mpa)
0%	7 días	4,91	17,9
25%	7 días	6,51	26,24
50%	7 días	7,28	29,13
100%	7 días	7,1	29,93
0%	28 días	6,04	21,49
25%	28 días	7,46	37,81
50%	28 días	10,99	45,51
100%	28 días	11,61	47,75

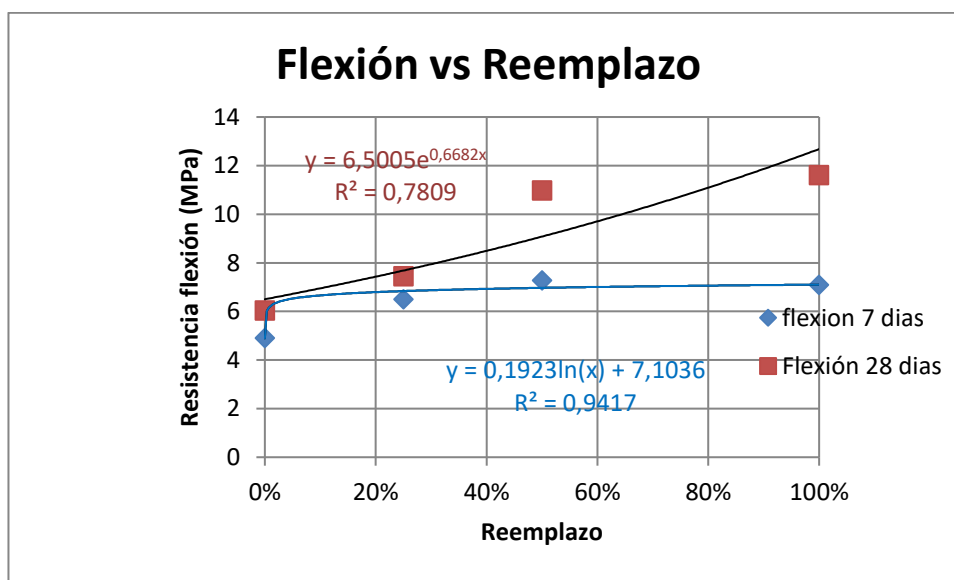


Fig. 4.13. Gráfica de ensayos de flexión a 7 y 28 días.

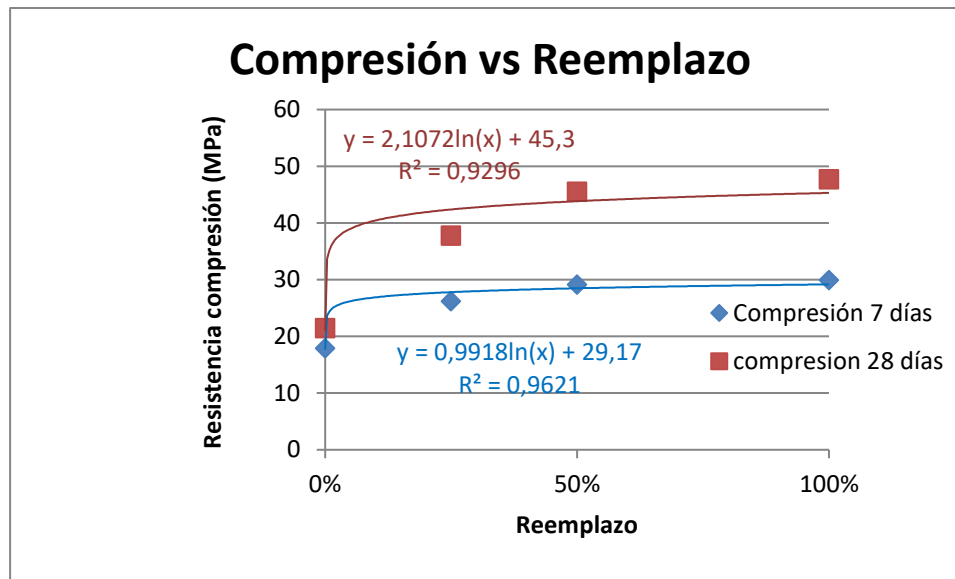


Fig.4.14. Grafica de ensayos de compresión a los 7 y 28 días.

4.4. Resultados experimentales de ensayos realizados sobre HAC

En este punto se exponen todas las combinaciones realizadas en la fabricación de HAC; comenzando por la dosificación del HAC de control (HAC-C) y posteriormente reemplazando FC por residuo cerámico polvo (en adelante RCP) al 50% y al 100% respectivamente, dando origen a los HAC-R50 y HAC-R100.

Asimismo, se realizarán y expondrán los resultados de los ensayos de caracterización correspondientes al estado fresco y endurecido de los HAC fabricados.

4.4.1. Composición de los HAC a fabricar

En el punto 3.6.4; sentamos las bases de diseño del HAC-C y en base a este diseño serían las combinaciones de los HAC-R50 y HAC-R100. La diferencia entre el HAC-C y los HAC-R50 y HAC-R100 es la sustitución del FC por RCP al 50% o al 100%. En Tabla 61 se reflejan las combinaciones de los materiales propuestos en cada modificación.

Tabla 61. Combinación de materiales en los HAC a fabricar.

Referencia	HAC-C	HAC-R50	HAC-R100
Árido grueso	GC 4/16 mm	GC 4/16 mm	GC 4/16 mm
Árido fino	AC 0/2 mm ASI 0/1 mm	AC 0/2 mm ASI 0/1 mm	AC 0/2 mm ASI 0/1 mm
Adición	FC 100%	FC 50% + RCP 50%	RCP 100%
Cemento	CEM I 52,5 R	CEM I 52,5 R	CEM I 52,5 R
Aditivo	Máster Ease 5025	Máster Ease 5025	Máster Ease 5025

En Tabla 62 se indican las cantidades para una amasada de 1m³ con los diseños planteados. Para este cálculo de cantidades, tanto en peso como en volumen se tienen en cuenta las densidades de los materiales, pero no las humedades de dichos materiales ya que estas oscilan entre 0,06 – 0,68 % y son muy pequeñas.

Tabla 62. Dosificaciones en peso y volumen para 1 m³de amasada de HAC

Tipo de HAC	HAC-C			HAC-R50			HAC-R100		
Material	kg/m ³	d (g/cm ³)	Volumen (l)	kg/m ³	d (g/cm ³)	Volumen (l)	kg/m ³	D g/cm ³	Volumen (l)
CEM I 52,5R	350	3	117	350	3	117	350	3	117
FC	200	2,72	74	100	2,72	37	--	2,72	-
RCP				100	2,63	38	200	2,63	76
GC 4/16	1087	2,66	409	1087	2,66	409	1087	2,66	409
AC 0/2	460	2,68	172	460	2,68	172	460	2,68	172
ASI 0/1	182	2,63	69	182	2,63	69	182	2,63	69
Aditivo	5,25	1,05	5	5,25	1,05	5	5,25	1,05	5
Agua	180	1,00	180	180	1,00	180	180	1,00	180
Total	2464,25		1026	2464,25		1027	2466,25		1038

La relación en peso agua cemento la mantenemos en 0,51

4.4.2. Prueba preliminar del HAC-C

Se realiza una primera amasada de 30 l manteniendo las cantidades de kg/m³de la Tabla 62 pero recalculadas para 30 l de volumen de amasada.

En Tabla 63 se indican las cantidades para 30 l.

Tabla 63. Dosificación en peso y en volumen para amasada de 30 l del HAC-C

Material	Peso (kg)	d(g/cm ³)	Volumen (l)
CEM I 52,5 R	10,50	3,00	3,5
FC	6,00	2,72	2,2
GC	32,60	2,66	12,3
AC	13,80	2,68	5,2
ASI	5,44	2,63	2,07
Aditivo	0,158	1,05	0,15
Agua	5,40	1,00	5,40
Total	73,89		30,82

La amasada se realiza en amasadora de 100 l; previo pesado de todos los materiales en balanza electrónica. Los materiales son introducidos en el siguiente orden:

- . Previamente se elimina el agua que pueda estar en la hormigonera y se humedece dicha hormigonera, evitando de esta forma modificar la relación agua/cemento.
- . Primero los áridos, comenzando por el de mayor granulometría GC 4/16 mm, seguido de la AC 0/4 mm y de la ASI 0/2 mm.
- . Una vez metidos los áridos en la hormigonera, introducimos las adiciones; en este caso sólo el FC y posteriormente el cemento CEM I 52,5R.
- . Introducidos todos estos materiales se dan unas vueltas con la hormigonera en marcha para que se mezclen bien.
- . Seguidamente y durante 20 segundos, añadimos el agua el cual lleva incorporado el aditivo plastificante Máster Ease 5025.
- . Amasamos durante 3 minutos y se para para que se reposen los materiales durante 2 minutos. Posteriormente se sigue amasando durante 3 minutos.

El aspecto del material amasado parece bastante bueno y se decide vaciar la hormigonera para hacer los ensayos de caracterización de este HAC-C de prueba. En Figuras 4.15, 4.16 y 4.17 se representan las fases del proceso de amasado de estos 30 l de HAC-C.



Fig. 4.15. Hormigonera de 100 l. Parte exterior e interior. LADICIM.



Fig.4.16. Cargado de materiales (izquierda cemento) derecha (agua) LADICIM.



Fig.4.17. Estado del HAC-C una vez amasado en el interior de la hormigonera LADICIM.

Una vez amasado el HAC-C, se procede a realizar los siguientes ensayos de caracterización en estado fresco:

. **Escurecimiento cono de Abrams.** Los diámetros obtenidos con las tortas durante el escurrimiento han sido $d_1 = 570$ mm y $d_2 = 530$ mm; por tanto, el SF es de $530 + 570/2 = 550$ mm. El tiempo tomado en alcanzar los 500 mm ha sido de 12 segundos, por tanto, $t_{500} = 12$ segundos.

En Figura 4.18 se muestra la medición de los dos diámetros de la superficie de escurrimiento



Fig. 4.18. Medición diámetros de superficie de escurrimiento. LADICIM.

. **Ensayo de caja en L.** Las alturas obtenidas en el ensayo han sido las siguientes:
 $H_2 = 150 \text{ mm} - 115 \text{ mm}$ (altura en la parte horizontal de la caja) = 35 mm
 $H_1 = 600 - 420 \text{ mm}$ (altura en el interior de la caja) = 180 mm
 $PL = 35/180 = 0,22$.

En Figura 4.19 se muestra ensayo de caja en L. En dicha figura se puede ver también la estabilidad del HAC-C de forma visual ya que no se acumulan agregados detrás de la rejilla de la armadura y en la parte horizontal de la caja en L se ven los granos del árido grueso distribuidos homogéneamente por toda la superficie.



Fig. 4.19. Ensayo de caja en L. LADICIM.

. **Ensayo de escurrimiento con anillo japonés.** Realizado el ensayo Figura 4.20, las mediciones obtenidas son las siguientes:

$\Delta h_{x1} = \Delta h_{x2} = \Delta h_{y1} = \Delta h_{y2} = 105 \text{ mm}$ en cada una de las mediciones.

$\Delta h_0 = 80 \text{ mm}$ $PJ = 105 \times 4 / 4 - 80 = 25 \text{ mm}$



Fig.4.20. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés del HAC-C. LADICIM.

Los resultados de caracterización en estado fresco de esta amasada de 30 l de prueba del HAC-C se exponen en Tabla 64.

Tabla 64. Resultados de caracterización en fresco amasada de 30 l de HAC-C.

Ensayo	Resultado	Criterio UNE-EN 206-9	Clase UNE-EN 206-9
SF (mm)	550 mm	550-850	AC-E1
T₅₀₀ segundos	12 segundos	$5 \leq t_{500} \leq 8$	No cumple
PL	0,22	$>0,8$	No cumple
PJ (mm)	25	≤ 10	No cumple
Densidad kg/m³	2,38		

. **Densidad en estado fresco del HAC-C de prueba.** Se pesa el HAC-C, contenido en un molde cilíndrico de 30 cm de altura y 15 cm de base, obteniendo un peso de 12,640 kg. Figura 4.21.

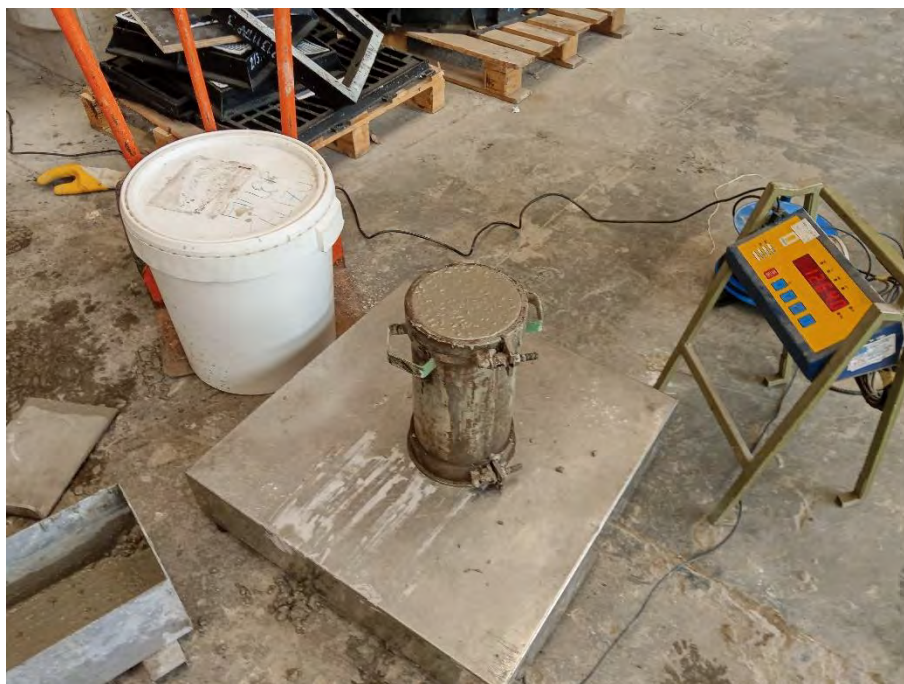


Fig.4.21. Pesado del HAC-C en estado fresco. LADICIM.

La densidad se obtiene mediante el cociente del peso y del volumen del molde resultando una densidad de $2,38 \text{ kg/m}^3$.

Los resultados preliminares, muestran que en esta primera amasada de prueba, cumple con el escurrimiento (SF) catalogándose como AC-E1 según UNE-EN 206-9 pero no cumpliendo con los otros requisitos; t_{500} , caja en L y anillo japones. Aun así, se observa una buena consistencia en el HAC-C de prueba por lo que se decide dar esta dosificación como adecuada, tomando la precaución de que al volver a realizar esta dosificación en la amasada de 85 l del HAC-C se agregará más agua para mejorar la consistencia y cumplir con los requisitos de la norma UNE-EN 206-9.

. Fabricación de probetas. Una vez realizados los ensayos de caracterización del HAC-C de prueba en estado fresco; se procede a fabricar 5 probetas cúbicas de 100 mm de arista y 2 cilíndricas normalizadas de 300 mm de altura y 150 mm de base, las cuales son desmoldeadas a las 24 h Figura 4.22 y guardadas en cámara de humedad en condiciones de curado controlado a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y 99 % de humedad relativa.

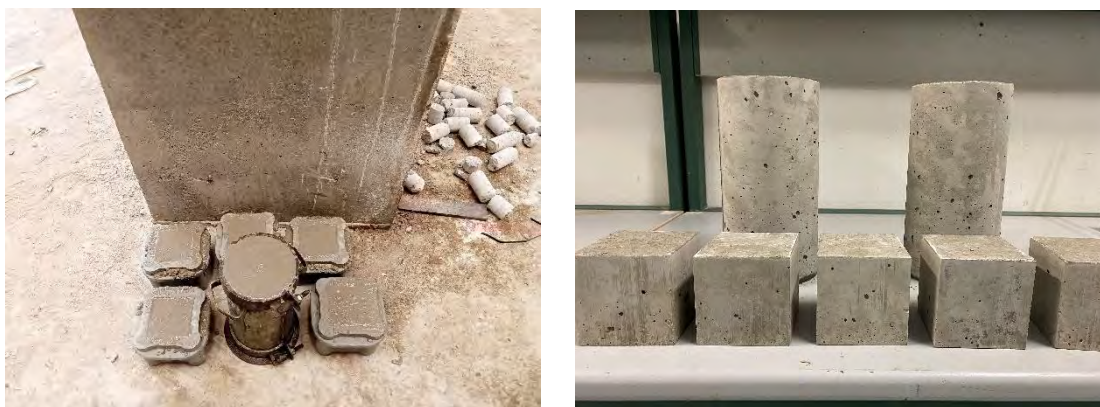


Fig. 4.22. Probetas en estado fresco y probetas desmoldeadas. LADICIM.

. **Estructura interna visual.** Una de las probetas cilíndricas a los 4 días de edad se secciona longitudinalmente por la mitad y se observa visualmente la distribución de los áridos en la pasta de hormigón. Figura 4.23



Fig.4.23. Probeta cilíndrica seccionada longitudinalmente HAC-C prueba. LADICIM.

En la fotografía, se observa que no hay segregación, como se vio en los ensayos de caracterización en estado fresco, siendo la distribución de los áridos muy uniforme en toda la superficie del HAC-C de prueba.

. **Ensayo de rotura a compresión.** Se realiza un primer ensayo a los 4 días de edad con una probeta cúbica de 100 x 100 mm en prensa hidráulica modelo CME150/20, obteniéndose el siguiente resultado:

Fuerza máxima = 510,4 kN = 510.400N $f_c = F_{\text{máxima}}/S = 510.400/10.000 = 51,04 \text{ MPa}$

En figura 4.24 se representa la prensa de ensayo, resultados y estado de la probeta tras el ensayo.



Fig.4.24. Prensa de ensayo, resultados del ensayo y probeta tras el ensayo de compresión del HAC-C de prueba a los 4 días de edad LADICIM.

También se realiza ensayo de rotura a compresión con otras dos probetas cubicas a los 7 días, guardando las dos probetas cúbicas restantes para hacer el ensayo a los 28 días de edad. En Tabla 65 se muestran los resultados de estos ensayos.

Tabla 65. Ensayos de rotura a compresión del HAC-C de prueba.

Probeta	Edad (días)	Resistencia a compresión MPa	Media MPa
HAC-C 17/2/22- 1	4	51,04	51,04
HAC-C 17/2/22 -2	7	54,28	52,81
HAC-C 17/2/22 -3		51,34	
HAC-C 17/2/22 -4	28	43,45	42,85
HAC-C 17/2/22 -5		42,25	

4.4.3. Fabricación del HAC-C

A la vista de los resultados de la amasada de prueba de 30 l del HAC-C; se decide hacer una amasada de 85 l, conservando el diseño realizado en la Tabla 61 en kg/m^3 pero recalculándolo para 85 l de volumen de amasada. Estos cálculos de dosificación se exponen en Tabla 66.

Tabla 66. Cálculo de materiales en peso y volumen amasada de 85 l HAC-C.

Materiales	Amasada de 1 m ³			Amasada de 85 l		
	kg/m ³	d (kg/m ³)	Volumen (l)	Peso (kg)	d (kg/m ³)	Volumen (l)
CEM I 52,5R	350	3,00	117	29,80	3,00	9,90
FC	200	2,72	74	17,10	2,72	6,30
GC 4/16	1087	2,66	409	92,50	2,66	34,70
AC 0/4	460	2,68	172	39,20	2,68	14,60
ASI 0/1	182	2,63	69	15,50	2,63	5,86
Aditivo	5,25	1,05	5	0,45	1,05	0,425
Agua	180	1,00	180	15,30	1,00	15,30
Total	2464,25		1026	209,85		87,08

Relación agua /cemento en peso = 0,51

Una vez que se tienen calculadas las cantidades de los materiales, se procede a su pesado en balanza electrónica. En Figura 4.25 se representan parte de los materiales pesados, así como el pesado del agua



Fig.4.25. Materiales y pesado del agua.
LADICIM.

Para el amasado de estos 85 l de HAC-C se utiliza amasadora de 200 l de capacidad ubicada en LADICIM Figura 4.26, siguiendo el siguiente proceso:



Fig. 4.26. Exterior e interior de amasadora de 200 l. LADICIM.

. Previamente eliminamos el agua que pueda estar en la amasadora y humedecemos dicha amasadora para evitar modificar la relación agua/cemento.

. Los materiales sólidos son introducidos en la hormigonera comenzando por los áridos de mayor a menor granulometría: GC 4/16mm, AC 0/4mm y ASI 0/1mm.

. Seguidamente introducimos las adiciones; en este caso solo el FC y posteriormente el cemento Portland CEM I 52,5R. Una vez introducidos todos estos materiales, ponemos en marcha la hormigonera y mezclamos durante 3 minutos en seco para homogeneizar los materiales.

. Seguidamente añadimos la mitad del agua de dosificación sin el aditivo, durante 15 segundos y amasamos durante 3 minutos.

. Paramos durante un momento para sacar una muestra de la mezcla Figura 4.27.



Fig. 4.27 Muestra a los 3 minutos de amasado LADICIM.

En esta muestra observamos que el árido está bien recubierto del cemento y que comienza a hidratarse dicho cemento.

. Añadimos el resto del agua de dosificación con el aditivo Máster Ease 5025 y seguimos amasando 3 minutos.

. Paramos amasadora para reposar la mezcla durante 3 minutos.

. Seguimos amasando durante 5 minutos y observamos el estado del material; el cual necesita algo más de agua. Añadimos 2,23 l de agua extra.

. Seguimos amasando durante 2 minutos para homogeneizar bien el agua añadida.

. El total de tiempo de amasado ha sido de 16 minutos y el agua total añadido en esta amasada de 85 l de HAC-C ha sido de 15,20 l + 2,23 l = 17,43 l; lo cual debemos tenerlo en cuenta para posteriores dosificaciones a realizar.

En Figura 4.28, se representa el estado del HAC-C transcurridos los 16 minutos de amasado.



Fig. 4.28. Estado del HAC-C a los 16 minutos de amasado. LADICIM.

Una vez que se da el visto bueno a la amasada, se procede a realizar los ensayos de caracterización del HAC-C en estado fresco y a la fabricación de probetas.

. Ecurrimiento cono de Abrams

Los ensayos de escurrimiento han dado los siguientes resultados:

$$d_1 = 500\text{mm} \quad d_2 = 500\text{mm} \quad SF = 500 + 500/2 = 500\text{mm}.$$

El tiempo tomado en alcanzar los 500 mm ha sido de 6 segundos $t_{500} = 5$ segundos.

En Figura 4.29 se muestra el estado de la torta en el ensayo de escurrimiento.



Fig.4.29. Ensayo de escurrimiento HAC-C. LADICIM.

. Ensayo de caja en L

Las alturas obtenidas en este ensayo han sido las siguientes:

$H_1 = 440\text{mm} - 460\text{mm} - 440\text{mm}$. La media aritmética es 440mm. $H_1 = 600 - 440 = 160\text{mm}$

$H_2 = 130\text{mm} - 127\text{mm} - 132\text{mm}$. La media aritmética es 130mm. $H_2 = 150 - 130 = 20\text{mm}$

$PL = H_2/H_1 = 20\text{mm}/160\text{mm} = 0,13$.

El tiempo en fluir el HAC-C en la caja ha sido de 7,77 segundos.

En figura 4.30 se muestra realización del ensayo



Fig. 4.30. Ensayo de caja en L del HAC-C. LADICIM.

Este HAC-C ensayado y de forma visual, se observa que no se acumulan agregados detrás de las rejillas de la armadura y la distribución del árido grueso es muy uniforme.

. Ensayo de embudo en V.

El tiempo transcurrido desde que abrimos la compuerta inferior del embudo hasta que se vacía totalmente el HAC-C existente en el embudo (10,5 l) es de 9,9 segundos; por lo tanto, $t_v = 9,9$ segundos.

En Figura 4.31 se observa la realización del ensayo.



Fig.4.31. Carga y descarga del embudo en V del HAC-C LADICIM.

. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés

Realizado el ensayo, Figura 4.32 los resultados obtenidos son los siguientes:

$H_{x1}= 101\text{mm}$ $h_{x2}= 91\text{mm}$ $h_{y1}= 103 \text{ mm}$ $h_{y2}=97\text{mm}$ $h_0=88\text{mm}$

$PJ = (101+91+103+97/4)-88 = 10 \text{ mm}$





Fig.4.32. Ensayo anillo japonés HAC-C. LADICIM.

Como se puede observar en las fotografías no se observan signos de segregación, estando el árido uniformemente repartido.

. Densidad en estado fresco del HAC-C

Se pesa el material contenido en un molde cilíndrico de 300mm de altura y 150mm de base; obteniéndose un peso de 11,530 kg y resultando una densidad de 2,17 kg/m³.

. Resumen de caracterización del HAC-C en estado fresco

En Tabla 67 se recogen los resultados de los ensayos realizados

Tabla 67. Resultados de los ensayos de caracterización del HAC-C en estado fresco.

Ensayo	Resultado	Criterio UNE-EN 206-9	Clase según UNE-EN 206-9
SF (mm)	500	550-850	No cumple
T ₅₀₀ (segundos)	5	$5 \leq t_{500} \leq 8$	AC- V2
PL	0,13	$\geq 0,8$	No cumple
PJ (mm)	10	≤ 10	PJ1
T _v (segundos)	9,9	$6 \leq t_v \leq 10$	AC-V2
Densidad kg/m ³	2,17		

. Fabricación de probetas del HAC-C

Realizados los ensayos de caracterización en estado fresco del HAC-C, en paralelo se han ido fabricando probetas mediante la adición de HAC-C en los moldes correspondientes. Se colocan 12 moldes de probetas cúbicas de 100 mm de arista y 7 probetas cilíndricas normalizadas de 300 mm de altura y 150 mm de base.

La adición en los moldes se realiza sin ningún tipo de ayuda externa de compactación; solo de enrasado se realiza con ayuda exterior. El desmoldeo se realiza a las 24 horas y las probetas son metidas en cámara de humedad en condiciones de curado controladas de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y 99% de humedad relativa.

En Figura 4.33 se observan las operaciones de moldeado de probetas cúbicas y cilíndricas y en Figura 4.34 se observa el estado de probetas una vez desmoldeadas e introducidas posteriormente en cámara de humedad para su curado.



Fig. 4.33. Operaciones de moldeo HAC-C. LADICIM.



Fig. 4.34. Probetas cúbicas y cilíndricas desmoldeadas.

. Nueva dosificación del HAC-C

Debido a la adición de los 2,23 l de agua añadidos en el amasado de los 85 l del HAC-C; nos encontramos que en total en dicha dosificación tenemos $15,23 \text{ l} + 2,23 \text{ l} = 17,5 \text{ l}$ de agua, por lo cual tenemos que recalculamos dicha dosificación del HAC-C, dando como resultado la dosificación mostrada en la Tabla 68.

Tabla 68. Nueva dosificación en peso y volumen tras la adición de agua en la amasada del HAC-C.

		Amasada de 85 l HAC-C		Nueva dosificación de HAC-C 1m³	
Material	d (kg/m³)	kg	l	kg/m³	l
CEM I 52,5R	3,00	29,8	9,9	341	113,8
FC	2,72	17,1	6,3	196	72,1
GC 4/16mm	2,66	92,5	34,8	1060	398,6
AC 0/4mm	2,68	39,2	14,6	450	167,8
ASI 0/1mm	2,63	15,5	5,9	178	67,6
Aditivo Master Ease 5025	1.05	0,45	0,425	5	4,9
Agua	1,00	17,5	17,5	200	200
Total		212	89,4	2430	1025

De esta nueva dosificación resultante observamos los siguientes cambios más sensibles:

. El agua aumenta de 180 kg/m³ a los 200 kg/m³, con lo cual la relación agua/cemento en peso sube de 0,51 (en la amasada sin adición de agua) a 0,58 (una vez recalculada la dosificación).

.El cemento baja de una dosificación inicial de 350 kg/m³ a 341kg/m³ y el FC baja de 200 kg/m³ iniciales a 196 kg/m³.

Estos cambios en las dosificaciones de los materiales y que son con los que se han fabricado las probetas del HAC-C, parece que pueden dar lugar a una disminución en la resistencia a compresión, sobre todo debido al aumento del agua y a la disminución del cemento.

. Ensayos de rotura a compresión.

A manera de prueba se ha realizado el ensayo de rotura a compresión a 7 días de edad de 3 probetas cúbicas, dejando las otras 9 para hacer ensayos de compresión a los 28 días de edad.

En Tabla 69 se muestran los resultados obtenidos de rotura a compresión a diferentes edades de las probetas cúbicas del HAC-C fabricado.

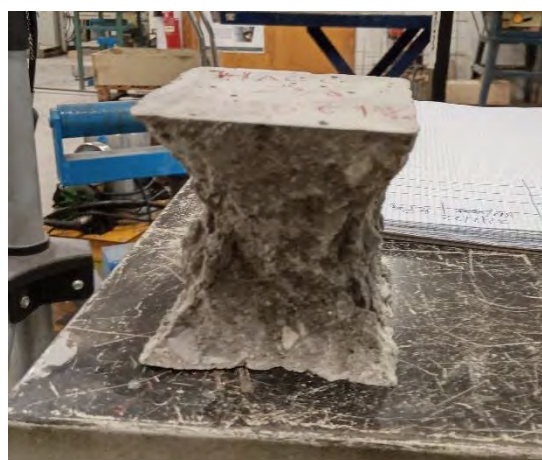
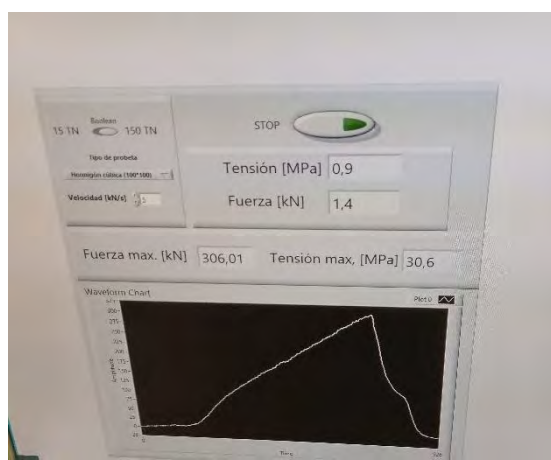
Tabla 69. Resultados de rotura a compresión del HAC-C.

Probeta	Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)	Media (MPa)
HAC-C 22/2/22-1	7	19,22	21,91
HAC-C 22/2/22-2		23,23	
HAC-C 22/2/22-3		22,59	
HAC-C 22/2/22-4	28	30,6	35,91
HAC-C 22/2/22-5		37,34	
HAC-C 22/2/22-6		39,81	

En Figuras 4.35 y 4.36 se representan probetas sometidas al ensayo de compresión del HAC-C a las edades de 7 y 28 días.



Fig. 4.35. Probeta de HAC-C 22/2/22-1 sometida a ensayo de compresión a los 7 días de edad.



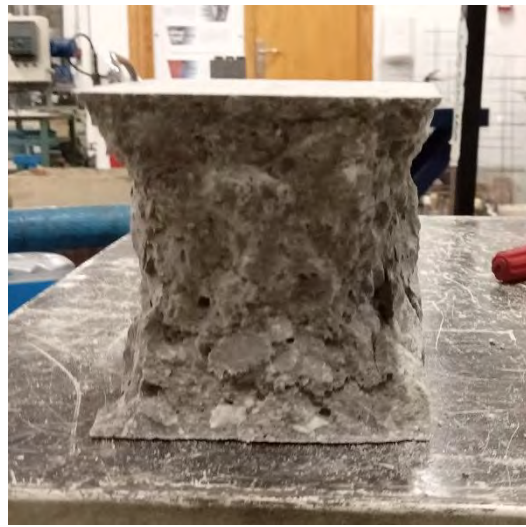
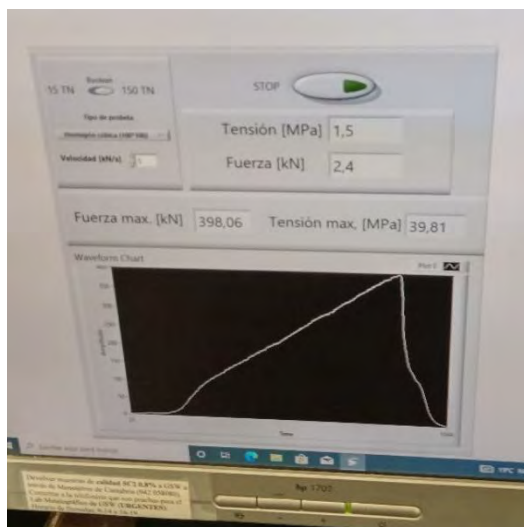
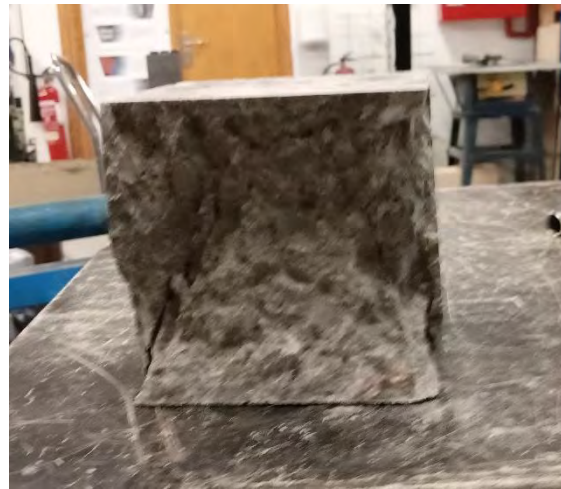
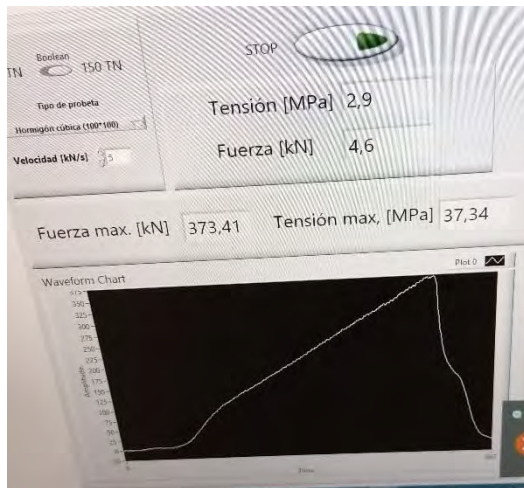


Fig.4.36. Ensayos de rotura a compresión a 28 días de probetas HAC-C 22/2/22-4; HAC-C 22/2/22-5 y HAC-C 22/2/22-6.

4.4.4. Fabricación del HAC-R100

En esta nueva amasada, se propone reemplazar la totalidad del FC por RCP; pero antes de hacer el diseño de la dosificación vemos un problema existente con el reemplazo total del FC por el RCP. Este problema consiste principalmente en que el RCP posee una granulometría mucho menor que el FC y debemos compensar esa diferencia de finura para evitar posibles problemas de resistencia a la compresión y de durabilidad del HAC-R100 a fabricar en estado endurecido.

En Tabla 70 se muestra la finura del FC, RCP, ASI y la combinación de RCP+ASI.

Tabla 70. Finura FC, RCP ASI.

	Filler calizo FC	Residuo Ceramico Polvo RCP	Arena silice ASI 0/1mm	Combinación RCP+ASI
Tamiz (mm)	Pasante %	Pasante %	Pasante %	Pasante %
1	100	100	96	100
0,25	96	100	26	95
0,125	84	100	6	95
0,063	64	100	1	95
0,001	0	0	0	0
		95%	5%	

En Figura 4.37 se representa la grafica granulométrica correspondiente al FC y al RCP; observando la gran diferencia existente en cuanto al tamaño de las particulas de ambos materiales

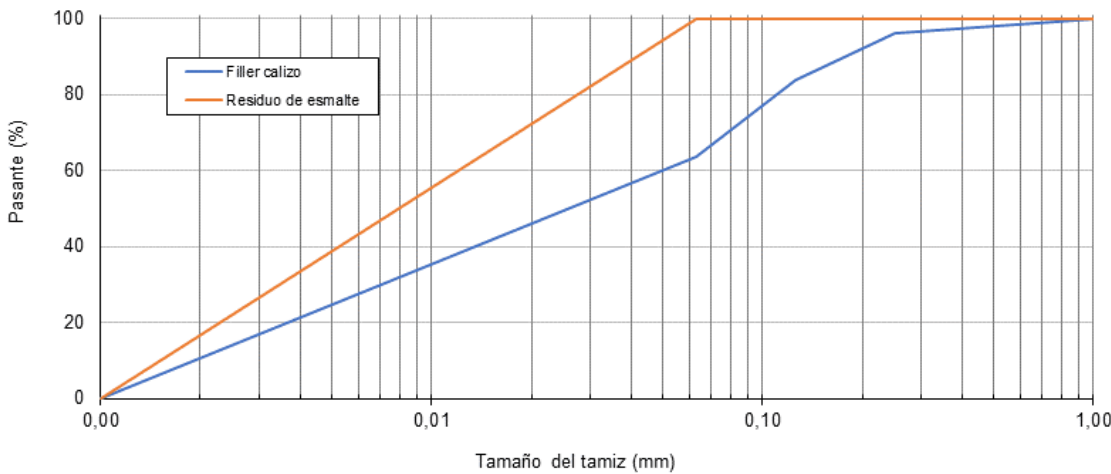


Fig.4.37. Grafica granulométrica de FC y RCP

Para disminuir esa diferencia de partículas entre estos materiales; sólo se reemplaza el filler en la dosificación con un 95% de RCP y el 5% restante se añadirá de ASI 0/1mm para compensar esa diferencia y a la vez aportar finos.

En Figura 4.38, se representa curva granulométrica del RCP y la combinación del 95% de RCP+ 5% de ASI y como se puede apreciar en comparación con la grafica de la Fig 4.37; esta curva es más coherente para hacer el diseño de la dosificación del HAC-R100 que vamos a fabricar.

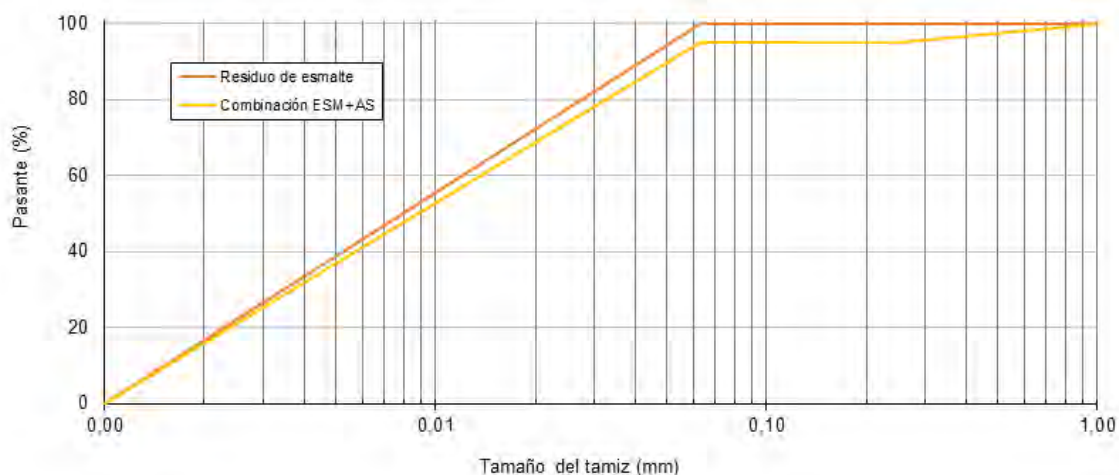


Fig.4.38. Curvas granulométricas de RCP y combinación de RCP+ASI.

La amasada a realizar del HAC-R100 será de 85 l; en base a la siguiente dosificación que se muestra en la Tabla 71.

Tabla 71. Dosificación del HAC-R100 para 1 m³y 85 l

Materiales	kg/m ³	kg/85 l
Cemento CEM I 52,5 R	341	29
RCP	189	16,1
GC 4/16mm	1060	90,1
AC 0/4mm	460	38,2
ASI 0/1mm	178	15,1
Aditivo plastificante Master Ease 5025	5,12	0,453
Agua	200	17
Total	2430	206

Relacion agua/cemento en peso = 0,59.

La amasadora utilizada es la de 200 l de capacidad y la carga de dicha amasadora se realiza exactamente igual que las realizadas anteriormente.

Una vez cargados los áridos y adiciones, se pone en marcha la amasadora en seco con objeto de homogeneizar los materiales durante 3 minutos.

Seguidamente añadimos la $\frac{1}{2}$ de agua dosificada; durante 20 segundos y amasamos durante 3 minutos. Trascurrido este tiempo, sacamos una muestra para ver como se va hidratando la mezcla Figura 4.39



Fig 4.39. Muestra de HAC-R100 con la mitad de agua y 3 minutos de amasado.

En Figura 4.40 se puede observar la diferencia de color existente entre el HAC-C y este HAC-R100, debido al color rojizo del RCP.



Fig.4.40. Muestra de HAC-R100 (izquierda) y HAC-C (derecha).

Añadimos seguidamente el resto del agua de dosificación con el aditivo plastificante Master Ease 5025 disuelto en el agua y seguimos amasando durante 3 minutos.

Paramos de amasar para reposar la mezcla durante 3 minutos.

Seguimos amasando durante 5 minutos y observamos de nuevo el estado del material; llegando a la conclusión que debemos añadir mas agua, agregando 2,08 litros y seguimos

amasando 3 minutos para homogeneizar la mezcla con el agua añadida. Una vez homogeneizada la mezcla, volvemos a sacar una muestra para observar el estado del HAC-R100 amasado. En Figura 4.41. se observa el estado del material dentro de la amasadora y una muestra del mismo; una vez añadidos los 2,08 l de agua.



Fig.4.41. Muestra del HAC-R100 con el agua extra añadida.

En la muestra seguimos viendo el color rojizo que toma este hormigón debido al color del RCP añadido como reemplazo de FC. La muestra con el agua añadida parece correcta pero evidentemente al añadir el agua la dosificación ha cambiado siendo la nueva dosificación la planteada en la Tabla 72 y a esta nueva dosificación la llamaremos en adelante HAC-R100

Tabla 72. Nueva dosificación del HAC-R100A.

Material	Densidades kg/m ³	Dosificación HAC-R100 inicial kg/m ³	kg/85 l	Se añadio (l)	Total utilizado kg/85 l	HAC- R100A l/m ³	HAC- R100A kg/m ³
Cemento CEDM I 52,5 R	3,00	341	29	--	29	111	333
Agua	1,00	200	17	2,08	19,08	219	219
RCP	2,63	180	16,1	--	16,1	70	185
GC 4/16mm	2,66	1060	90,1	--	90,1	389	1036
AC 0/4mm	2,68	450	38,2	--	38,2	164	439
ASI 0/1 mm	2,63	187	15,1	--	15,1	66	174
Aditivo	1,05	5,12	0,453	--	0,453	4,96	5
Total		2423	206		208	1025	2391

La nueva relación en peso agua/ cemento en esta dosificación es de 0,66; con lo cual al añadir el agua extra la relación agua/cemento ha subido de 0,59 a 0,66.

Una vez que se ha dado el visto bueno a la amasada se procede a realizar los ensayos de caracterización en estado fresco de esta dosificación del HAC-R100A y a la realización del moldeado de probetas cúbicas y cilíndricas normalizadas.

Resumen de los ensayos de caracterización del HAC-R100A en estado fresco

En Tabla 73 se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 73. Resultados de ensayos de caracterización en estado fresco del HAC-R100A.

Ensayo	Resultado	Criterio UNE-EN 206-9	Clase según UNE-EN 206-9
SF (mm)	433	550-850	No cumple
T₅₀₀(segundos)	5	5 ≤ T ₅₀₀ ≤ 8	AC V2
PL	0,7	>0,8	No cumple
T_v(segundos)	6	6 ≤ T _v ≤ 10	AC V2

Se observa en los resultados que el escurrimiento y la caja en L no cumplen con la norma UNE-EN 206-9 y por lo tanto no son satisfactorios; sin embargo los parámetros de T₅₀₀ y embudo en V sí cumplen con la norma, clasificando la viscosidad de este HAC-R100A como ACV2.

Fabricación de probetas HAC-R100A

Realizados los ensayos de caracterización en estado fresco del HAC-R100A, en paralelo se han ido fabricando probetas mediante la adición del HAC-R100A en los moldes correspondientes, sin ningún tipo de ayuda externa de compactación. En total se fabrican 12 probetas cúbicas de 100mm de arista y 8 cilíndricas normalizadas de 300mm de altura y 150mm de base. El

desmoldeado se realiza a las 24 h y las probetas son conservadas en cámara de humedad en condiciones de curado controladas de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y 99% de humedad relativa.

En Figura 4.40 se muestran las probetas recién moldeadas y una vez desmoldeadas a las 24 h, del HAC-R100A.



Fig.4.42. Probetas recién moldeadas y desmoldeadas del HAC-R100A.

Se observa el color rojizo tanto en las probetas recién moldeadas como en las probetas desmoldeadas de este HAC-R100A. En Figura 4.43 se puede observar la diferencia de color debido al reemplazo del FC del HAC-C con el RCP en el HAC-R100A



Fig. 4.43. Diferencia de color entre el HAC-C (izquierda) y HAC-R100 A (derecha).

Corrección de la dosificación del HAC-R100 A

Con objeto de modificar de modificar el escurrimiento; todo el material utilizado en los ensayos de caracterización en estado fresco y el material sobrante de la dosificación del HAC-R100 A; fue devuelto a la amasadora y se añadió de nuevo 1,16 l de agua, amasando de nuevo 2 minutos para homogeneizar bien la mezcla. En total en la amasadora se introducen 29,6 l ya que el material gastado en las probetas ha sido de 12 probetas cúbicas x 1 l + 8 probetas cilíndricas normalizadas x 5,3 l = 54,4 l. También se consideran unas pérdidas de 1 l; por lo tanto, lo introducido de nuevo en la amasadora serán = 85 l – (54,4 + 1) = 29,6 l. Esta nueva adición de agua cambia la dosificación, dando origen al HAC-R100 B. La nueva dosificación se muestra en la Tabla 74.

Tabla 74. Nueva dosificación HAC-R100 B.

Material	d kg/m ³	HAC-R100A kg/m ³	kg/29,6 l	Se añade L	Total, kg utilizados	l/m ³ HAC-R100B	kg/m ³ HAC-R100B
CEM I 52,5 R	3,00	333	9,62	--	9,62	107	321
Agua	1,00	219	6,32	1,16	7,48	250	250
RCP	2,63	185	5,34	--	5,34	68	178
GC 4/16	2,66	1036	29,92	--	29,92	375	997
AC 0/4	2,68	439	12,68	--	12,68	158	423
ASI 0/1	2,63	174	5,02	--	5,02	64	168
Máster Ease 5025	1.05	5,00	0,144	--	0,144	4,58	4,81
Total		2391	69,05	1,16	70	1025	2340

La relación en peso agua/ cemento en esta nueva dosificación es 0,78.

En Tabla 75 se indican las variaciones en la relación agua/cemento en todas las amasadas realizadas del HAC-C y los HAC-R100 A y B; así como los kg/m³ de cemento CEM I 52,5 R y adiciones de finos FC y RCP.

Tabla 75. Variaciones agua/cemento + FC + RCP.

Dosificación	Relación peso agua/cemento	kg/m ³ CEM I 52,5 R	kg/m ³ FC	kg/m ³ RCP
HAC-C (1)	0,51	350	200	--
HAC-C (2)	0,58	341	196	--
HAC-R100	0,58	341	--	189
HAC-R100A	0,66	333	--	185
HAC-R100B	0,78	321	--	178

A la vista de la Tabla 75 se ve que la relación agua/cemento ha ido aumentando y evidentemente los kg/m³ de CEM I 52,5 R han ido disminuyendo, así como las adiciones de finos. El aumento de la relación en peso agua/cemento nos puede dar resultados más bajos en cuanto a la resistencia a compresión y está por ver si la adición de RCP logra mejorar los parámetros mecánicos de rotura a compresión.

. Ensayos de caracterización en fresco del HAC-R100B

Se realizan ensayos de caracterización en fresco y se moldean 5 probetas cúbicas de 100 mm de arista y 1 probeta cilíndrica normalizada de 300 mm de altura y 150 mm de base. En Tabla 76, se reflejan los resultados de la caracterización en fresco del HAC-R100B y en Figura 4.44 se muestra el HAC-R100B recién moldeado y desmoldeado a las 24 h.



Fig. 4.44. HAC-R100B recién moldeado (izquierda) y desmoldeado a las 24 h (derecha).

Tabla 76. Resultados de caracterización en estado fresco del HAC-R100B.

Ensayo	Resultado	Criterio UNE-EN 206-9	Clase según UNE-EN 206-9
SF (mm)	565	$550 \leq SF \leq 650$	AC-E1
T ₅₀₀ (segundos)	2	$2 \leq T_{500} \leq$	AC-V2

El mayor contenido de agua ha hecho que los ensayos de escurrimiento y el T₅₀₀ sean satisfactorios; catalogándose el HAC-R100B como AC-E1 en cuanto a escurrimiento y como AC-V2 en cuanto a su viscosidad. Tanto en los ensayos de caracterización en fresco del HAC-R100A como en el HAC-R100B, no se han apreciado ningún signo de segregación.

Las 5 probetas cúbicas y 1 cilíndrica normalizada, una vez desmoldeadas a las 24 h, se conservan en cámara de humedad en condiciones de curado controladas de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y 99 % de humedad relativa.

Ensayos de rotura a compresión

A los 7 días de edad se realizan ensayos de rotura a compresión tanto del HAC-R100A como del HAC-R100B; siguiendo la metodología de la norma UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3. Determinación de la resistencia a compresión de probetas. En Figura 4.45 se representan las probetas antes de someterse a ensayos de rotura a compresión a 7 días; 3 de probetas cúbicas HAC-R100A y 2 probetas de HAC-R100B

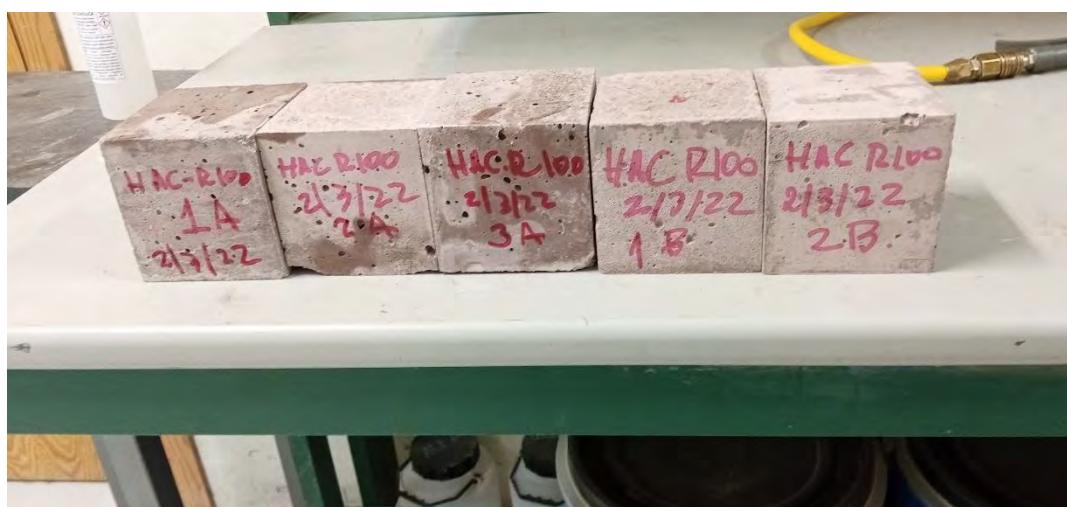


Fig.4.45. Probetas de HAC-R100A y HAC-R100B para ensayos de compresión a los 7 días.

Los ensayos son realizados en prensa servohidraulica de 1500 kN de capacidad, marca SUZPECAR, modelo CME 150/20. Los resultados obtenidos se muestran en Tabla 77 correspondientes a todas las amasadas realizadas el 2/3/22 tanto de HAC-R100A y de HAC-R100B.

Tabla 77. Resultados ensayos de rotura a compresión HAC-R100A y HAC-R100B.

Probeta	Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)	Media (MPa)
HAC- R100 A 1 2/3/22	7	27,96	27,98
HAC- R100 A 2 2/3/22		29,00	
HAC- R100 A 3 2/3/22		27,09	
HAC- R100 B 1 2/3/22	7	26,43	27,78
HAC- R100 B 2 2/3/22		29,13	
HAC- R100 A 4 2/3/22	28	40,43 *	48,28
HAC- R100 A 5 2/3/22		44,35	
HAC- R100 A 6 2/3/22		52,22	
HAC- R100 B 3 2/3/22	28	47,39	48,85
HAC- R100 B 4 2/3/22		51,02	
HAC- R100 B 6 2/3/22		48,14	

*Este dato de rotura no se ha tenido en cuenta al hacer la media, debido a que la dispersión es del 29 % con relación al mayor dato de rotura a los 28 días de las referencias HAC-R100A

En Figuras 4.46; 4.47; 4.48 y 4.49 se muestran detalles de la rotura a 7 días de edad de los HAC de referencias HAC-R100A y HAC-R100B



Fig. 4.46. Probeta HAC-R100 A1 colocada en prensa servohidraulica para ensayo de rotura a compresión.

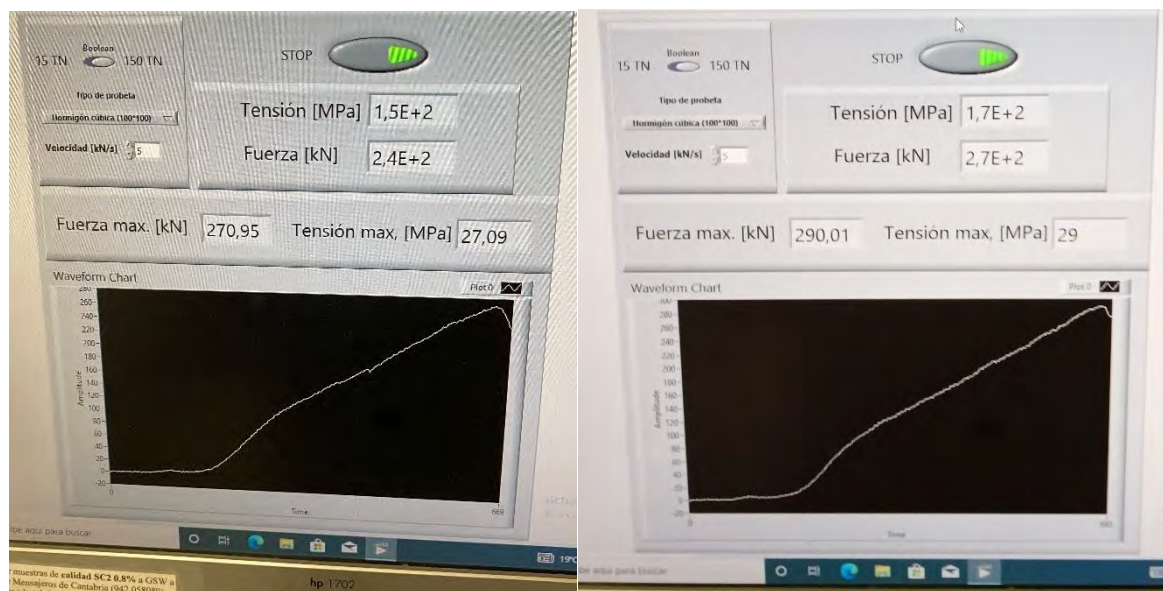


Fig. 4.47. Resultados de los ensayos de las probetas de referencias HAC-R100A3 (imagen izquierda) y HAC-R100A2 (imagen derecha).



Fig.4.48. Detalle de la rotura a compresión de las probetas HAC-R100 A1 (izquierda) HAC-R100 A2 (centro) y HAC-R100 A3 (derecha) a los 7 días de edad.

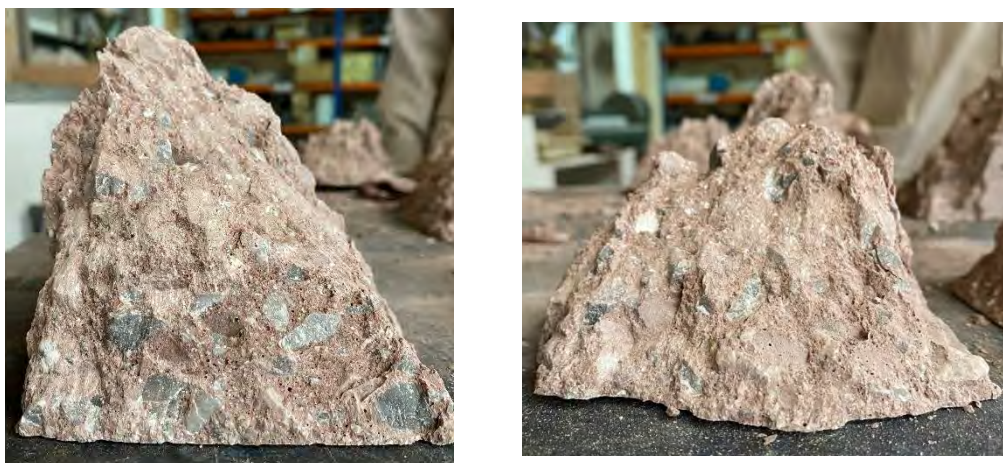


Fig. 4.49. Detalle de la rotura a compresión de las probetas HAC-R100 B1 (izquierda) y HAC-R100 B2 (derecha) a los 7 días de edad.

En Figuras 4.50; 4.51 y 4.52 se muestran evidencias de los ensayos de rotura a compresión a los 28 días de edad de las referencias HAC-R100A y HAC-R100B.

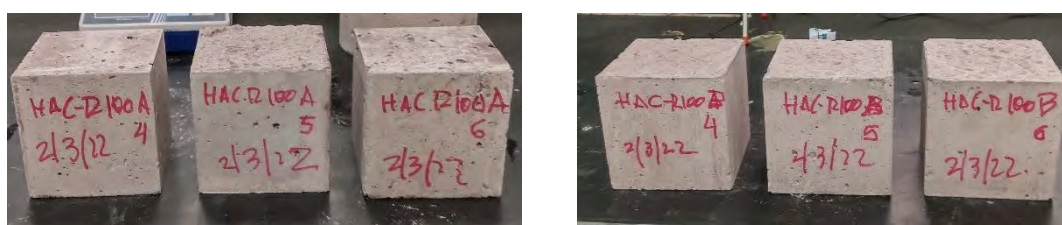


Fig. 4.50. Probetas para ensayar a los 28 días de edad, referencias HAC-R100A (4-5-6) y HAC-R100B (4-5-6).

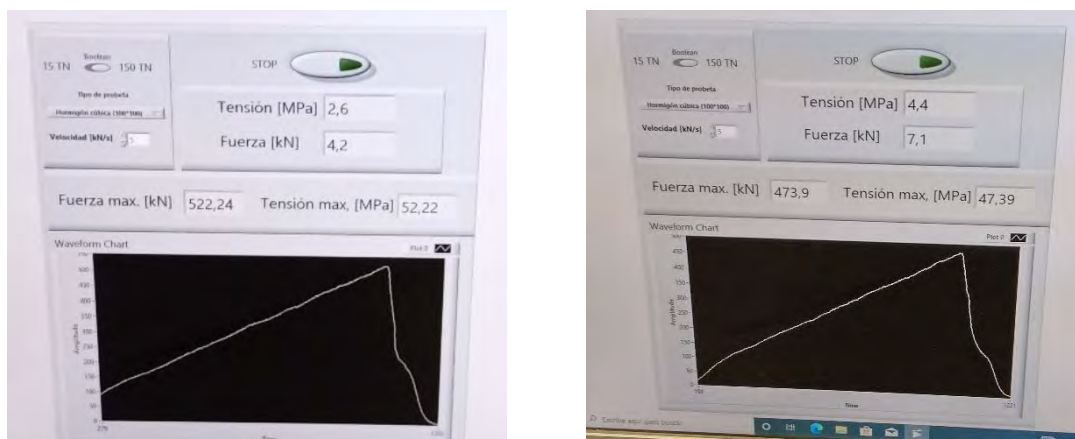


Fig.4.51. Resultados de ensayos de referencias HAC-R100A 6 (izquierda) y HAC-R100B 3 (derecha).



Fig.4.52. Probetas HAC-R100A y HAC-R100B tras el ensayo de rotura a compresión a los 28 días de edad.

4.4.5. Hormigones en estado endurecido

En este apartado se describen los ensayos realizados y sus resultados sobre los distintos hormigones autocompactantes fabricados. El apartado se divide en propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad.

El total de probetas fabricadas para la realización de los ensayos indicados anteriormente ha sido de 52; distribuidas en 34 cúbicas de 100 mm de arista y 18 cilíndricas normalizadas de 300 mm de alto y 150 mm de base, según se refleja en la Tabla 78.

Tabla 78. Total, de probetas fabricadas.

Referencia	Fecha amasada	Cúbicas de 100 mm de arista	Cilíndricas normalizadas de 300m de alto y 150 mm de base
HAC-C referencia	17/2/22	5	2
HAC-C	22/2/22	12	7
HAC-R100A	2/3/22	12	8
HAC-R100B	2/3/22	5	1
Subtotal		34	18
Total		52	

4.4.5.1 Aspecto de los HAC fabricados en estado endurecido

En Figura 4.53 se presenta el acabado de las probetas cilíndricas normalizadas de 300 mm de alto y 150 mm de base, así como las probetas cúbicas de 100 mm de arista de los distintos HAC fabricados y la distribución de las partículas de los diferentes áridos empleados. En las imágenes se puede apreciar el importante contenido de árido grueso presente en las dosificaciones; siendo totalmente compatible con la cantidad de mortero de cada dosificación.

En la primera columna de la Figura 4.53 se muestra el HAC-C; el cual presenta buen acabado superficial, así como abundantes poros que corresponden a burbujas de aire atrapado. En los cortes transversales se aprecian dichos poros internamente, siendo la distribución interna de los áridos gruesos muy homogénea y no existiendo signos de segregación en esta dosificación.

En la segunda columna de la Figura 4.53; se presenta el HAC-R100A, con un buen acabado superficial y menos cantidad de poros de burbujas de aire atrapado que la referencia HAC-C. Esta menor cantidad de poros se observan también en los cortes transversales; estando homogéneamente repartidos los áridos gruesos y no existiendo síntomas de segregación. La disminución de poros es un buen indicio de que no hay ninguna reacción extraña entre el RCP usado como reemplazo de FC y el resto de los componentes de esta dosificación. Cabe recordar que en esta dosificación la relación en peso de agua/cemento es de 0,66 y que en estado fresco el escurrimiento fue deficiente con una buena viscosidad.

También es importante el cambio de color de este hormigón con relación al HAC-C, debido a la adición del RCP como reemplazo del FC que confiere a esta dosificación un color rojizo debido al color que tiene el RCP. En el corte transversal es donde mejor se observa el color comentado

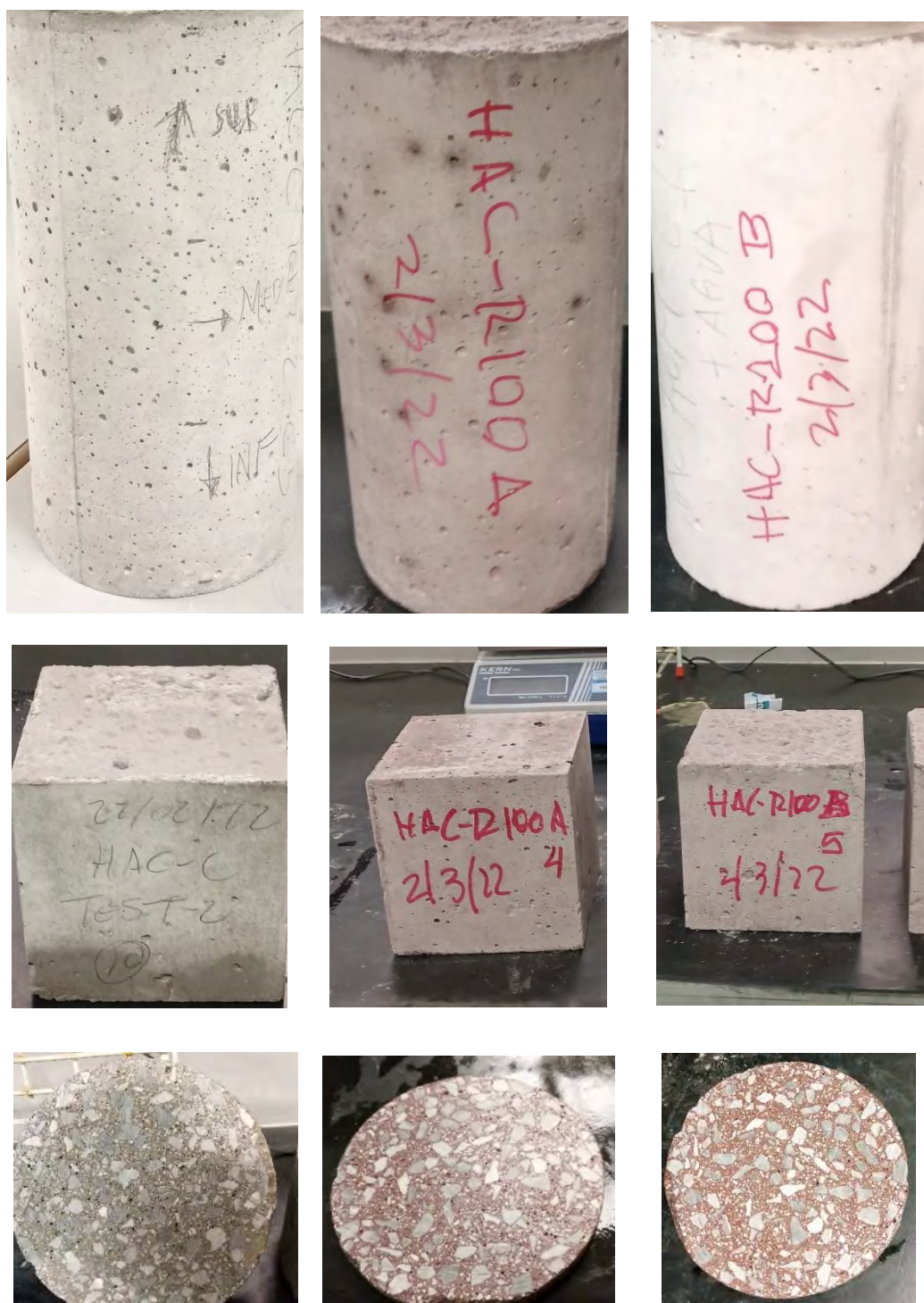


Fig.4.53. Acabado de las probetas cilíndricas y cúbicas y distribución de las partículas de áridos empleados en los distintos hormigones: HAC-C (izquierda), HAC-R100A (centro) y HAC-R100B (derecha).

Asimismo, podemos observar la buena distribución de áridos gruesos en el mortero, no existiendo signos de segregación.

En la tercera columna de la Figura 4.53 se presenta el HAC-R100B con un excelente acabado superficial y con menos poros de burbujas de aire atrapado que las referencias HAC-C y HAC-R100A. En esta dosificación la relación en peso agua/cemento aumento con relación a la HAC-R100A y este cambio propició un buen resultado en el escurrimiento y mejoro la viscosidad.

Al igual que la referencia HAC-R100A este HAC-R100B tiene color rojizo, como ya se dijo anteriormente debido al RCP, observando con mayor claridad este color en el corte transversal. También en dicho corte se observa un mínimo número de poros y la buena distribución de los áridos gruesos, no existiendo síntomas de segregación.

4.4.5.2. Preparación de probetas de ensayo

Para los ensayos mecánicos se han utilizado probetas cúbicas de 100 mm de arista y para los ensayos de caracterización física y de durabilidad se emplean probetas cilíndricas normalizadas.

Las probetas cilíndricas, en primer lugar, se marcan para hacer los cortes correspondientes. Se hacen marcas de 15 mm en la parte superior e inferior de la probeta. Los 270 mm restantes se dividen en tres tercios, resultando cada tercio de 90 mm. También se marca en la probeta la parte superior, media e inferior. Una vez se ha realizado el marcado se realizan los cortes en una sierra de disco de diamante refrigerada con abundante cantidad de agua.

En Figura 4.54 se muestra una probeta cilíndrica con las marcas para el corte y máquina cortadora



Fig.4.54. Probeta cilíndrica marcada para cortar y máquina de corte LADICIM.

En Figura 4.55 se muestran los tercios cortados correspondientes al HAC-C; HAC-R100A y HAC-R100B.

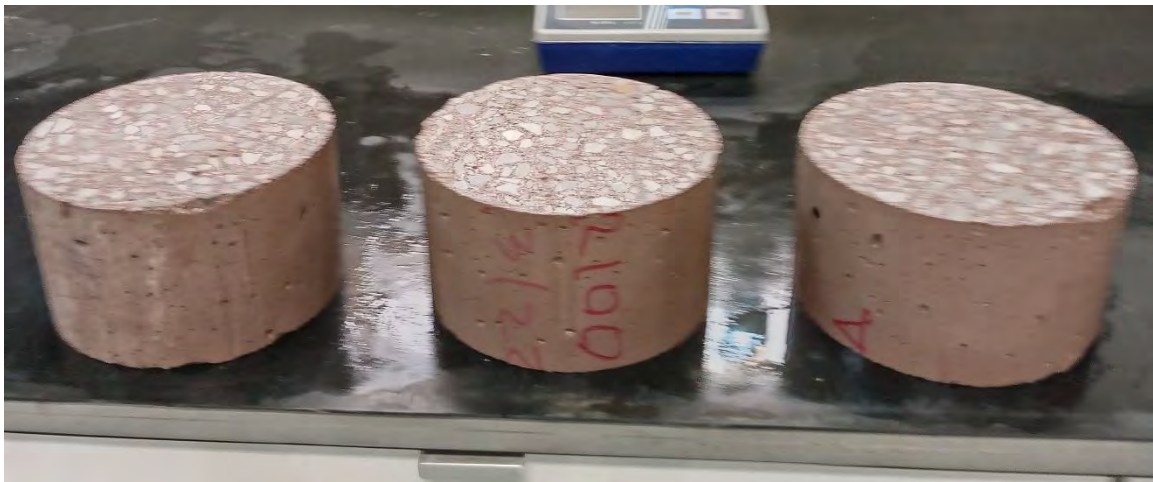


Fig. 4.55. Tercios cortados de HAC-C (imagen superior) HAC-R100A (imagen central) y HAC-R100B (imagen inferior).

4.4.5.3. Propiedades físicas

Para la determinación de las propiedades físicas se ha procedido de la siguiente forma:

- . Una vez cortadas las probetas cilíndricas como se indica en el punto 4.4.5.2; se tienen tres tercios de cada referencia de HAC fabricado; cada tercio de unos 90 mm de altura y 150 mm de base, estando totalmente identificadas las partes superior, medio e inferior.
- . Se colocan las probetas en cámara de vacío durante 24 h para extraer el aire que tenga el hormigón. Figura 4.56.

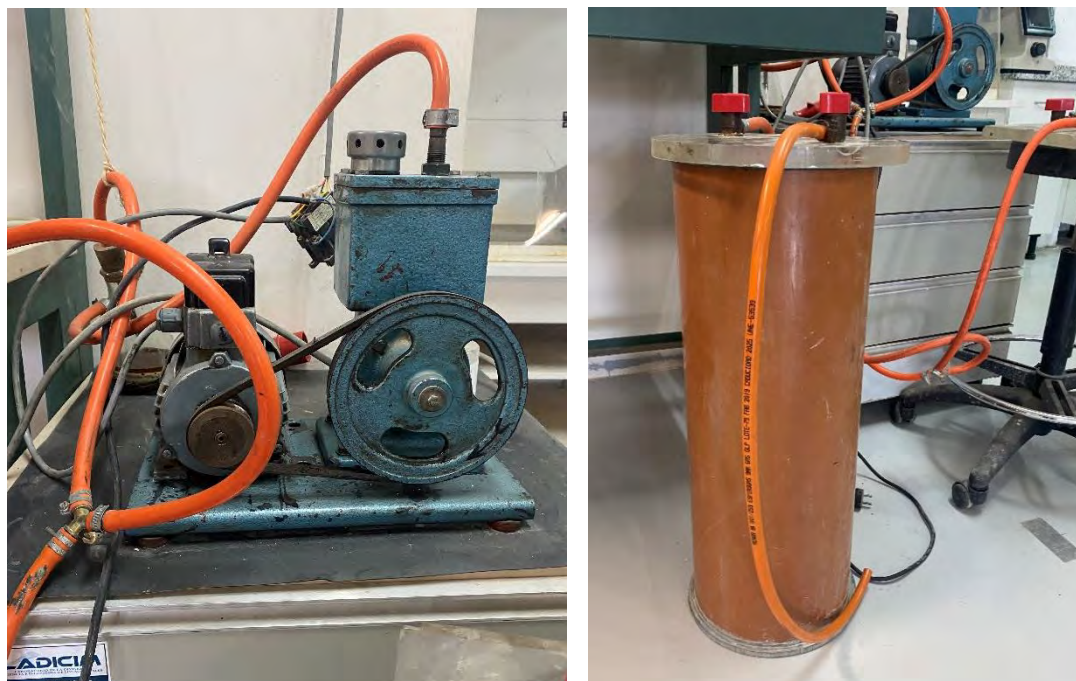


Fig. 4.56. Bomba de vacío y celda LADICIM.

- . Se cubren las probetas con agua, sin perder el vacío, durante 24 h. Posteriormente se quita el vacío y se dejan las probetas sumergidas en agua a presión atmosférica saturándose de humedad durante 24 h.
- . Se tara el recipiente con agua y por medio de un polipasto se sumergen cada uno de los tercios cortados, obteniendo un volumen aparente V_a aplicando el Principio de Arquímedes. Figura 4.57. Es importante que las probetas no pierdan humedad por lo tanto aquellas probetas que no estén siendo medidas sigan sumergidas en agua.
- . Para determinar el peso saturado superficialmente seco (P_{ss}) se retira la pieza del agua y con un paño seco se retira el exceso de agua, dejando la superficie sin el brillo que la muestra tiene cuando está húmeda; se pesa y se anota el dato.



Fig.4.57. Medición del Volumen aparente del tercio medio del HAC-C.

Concluido el Psss con todas las probetas, se meten en estufa a 100°C hasta peso constante, obteniendo el peso seco (Ps) de cada una de las muestras. En Figura 4.58 se presentan las probetas secas correspondientes al HAC-C



Fig.4.58. Probetas secas de HAC-C. Tercio superior (izquierda de la imagen); tercio medio (centro de la imagen) y tercio inferior (derecha de la imagen).

Una vez que tenemos los datos del Va; Psss y el Ps podemos ir calculando la ρ_a , poros accesibles, Vr, ρ_r , % porosidad (P) y coeficiente de absorción de agua en %. El cálculo de estos parámetros se realiza en función de las siguientes fórmulas:

. Poros accesibles h_a (cm^3) = $\frac{P_{sss} - P_s}{\gamma}$ γ = densidad del agua = 1 g/cm^3

. Volumen relativo Vr (cm^3) = $V_a - h_a$.

. Densidad aparente ρ_a (g/cm^3) = $\frac{P_s}{V_a}$.

. Densidad relativa = ρ_r (g/cm^3) = $\frac{P_s}{V_r}$.

. Coeficiente de absorción de agua (%) A = $\frac{P_{sss} - P_s}{P_s} \times 100$.

. Porosidad (%) $P = \frac{P_{ss} - P_s}{V_a} \times 100$.

Con todos estos datos obtenidos se elabora la Tabla 79 en la cual se detallan todos los parámetros de caracterización física de los hormigones fabricados HAC-C, HAC-R100A y HAC-R100B

Tabla 79. Resultados de caracterización física de HAC-C, HAC-R100A y HAC-R100B.

Tercio	Muestra	Ps (g)	Pss (g)	Va (cm ³)	da (g/cm ³)	Ha (cm ³)	Vr(cm ³)	dr (g/cm ³)	ds (g/cm ³)	% Porosidad	% Absorción
↑	HAC-C 22/2/22	2987,7	3137,3	1433,7	2,08	149,6	1284,7	2,33	2,19	10,43	5,03
→		2853,6	2990,5	1370,2	2,08	136,9	1233,3	2,31	2,18	9,99	4,80
↓		3003,5	3171,2	1454,9	2,07	168,7	1286,2	2,34	2,18	11,53	5,58
↑	HAC-R100A 2/3/22	3354,5	3453,1	1541,3	2,18	98,6	1447,7	2,33	2,24	6,40	2,94
→		3256,8	3343,1	1498,8	2,17	86,3	1412,5	2,31	2,23	5,76	2,65
↓		3248,6	3327,8	1479	2,20	79,2	1399,8	2,32	2,25	5,35	2,44
↑	HAC-R100B 2/3/22	3612,8	3695,4	1600,1	2,26	82,6	1517,5	2,38	2,31	5,16	2,29
→		3462,5	3536,4	1540,3	2,25	73,9	1466,4	2,36	2,30	4,80	2,13
↓		3288,8	3355,8	1454,2	2,26	67	1387,2	2,37	2,31	4,61	2,04

En base a los resultados de caracterización física a los 28 días de edad podemos hacer los siguientes comentarios:

. Las densidades de las distintas referencias son homogéneas en los distintos tercios de cada referencia, lo cual nos indica que la masa de hormigón está repartida de forma muy homogénea en todas las probetas cilíndricas normalizadas.

. Las adiciones de RCP confieren al HAC-R100A un aumento de la densidad aparente del 4,8% y al HAC-R100B un aumento de esta densidad del 8,6% con relación al HAC-C. De igual forma estas adiciones de RCP confieren al HAC-R100B un aumento de la densidad relativa del 2,1% con relación al HAC-C. La densidad saturada igualmente aumenta con la adición del RCP; siendo este aumento del 2,7% en el HAC-R100A y del 8,4% en el HAC-R100B con respecto al HAC-C. En General podemos decir que las adiciones de RCP aumentan la densidad, siendo mayor este aumento en el HAC-R100B.

La porosidad accesible de los hormigones fabricados con RCP (HAC-R100A y HAC-R100B) es muy inferior al hormigón HAC-C; siendo la media de porosidad accesible del HAC-C de 151,7 cm³ frente a 88,03 cm³ en el HAC-R100A y 74,5 cm³ del HAC-R100B. Estos datos nos dan que la disminución de porosidad accesible es del 88,03% y del 103% respectivamente. Esta disminución de porosidad accesible se debe a la propia naturaleza del RCP empleado como adición. Ya se vio en el punto 3.4.2.3 del Capítulo 3 que la parte vítrea del RCP era de 851,06 g de frita/kg de residuo, lo cual nos indica que el RCP tiene un alto porcentaje de frita (parte vítrea del residuo) y esto incide en una porosidad accesible mucho menor ya que la propia naturaleza del residuo impide la penetración de aire en la estructura de los hormigones HAC-R100A y HAC-R100B.

. El % de porosidad en el HAC-C es de 10,65% de media y en los HAC-R100A y HAC-R100B es de unos valores medios de 5,83% y 4,85%, lo cual representa una

disminución del % de porosidad del 83% y del 119% con relación al HAC-C; estos datos siguen en la línea de la disminución de la porosidad accesible. En Figura 4.59 se representa gráficamente los valores de porosidad encontrados en HAC-C, HAC-R100A y HAC-R100B

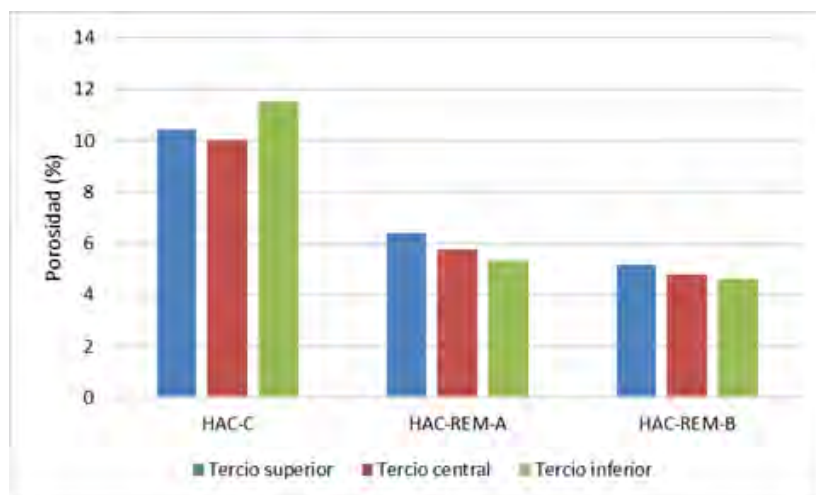


Fig.4.59 Porosidad de los tercios de probetas cilíndricas.

. Asimismo, los % de absorción van en línea con los % de porosidad. Los resultados obtenidos con la dosificación HAC-C (5,13% de media) son semejantes a los de un hormigón convencional; sin embargo, en los HAC-R100A y HAC-R100B esta absorción es mucho menor (2,67% de media) y (2,15% de media), lo cual hace que el % de absorción baje un 92% en el caso del HAC-R100A y un 138% en el HAC-R100B, con respecto al HAC-C. Sin duda esta disminución del % de absorción se debe a la naturaleza vítrea del residuo, el cual una vez posicionado en la masa del hormigón no permite absorber más agua frente al peso del hormigón. En Figura 4.60 se representa gráficamente la absorción encontrada en HAC-C, HAC-R100A y HAC-R100B.

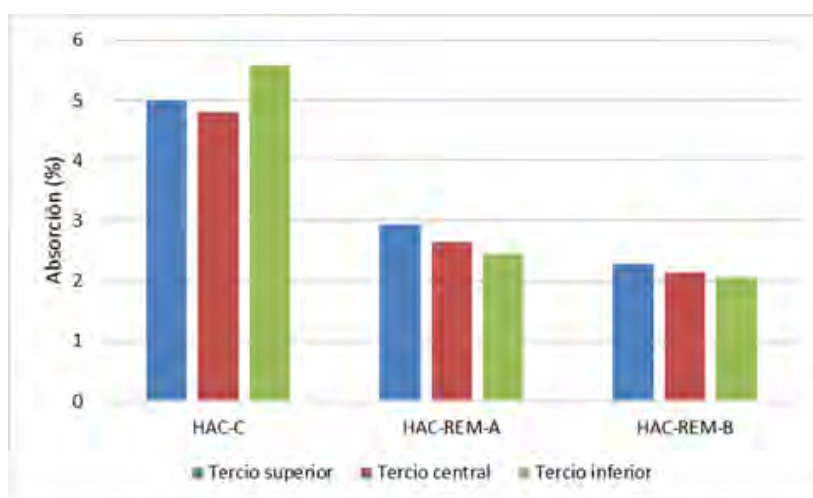


Fig.4.60. Absorción de los tercios de probetas cilíndricas.

4.4.5.4. Propiedades mecánicas

La propiedad mecánica clave en el desarrollo de este trabajo de investigación es la resistencia a compresión de los HAC fabricados. Todos los ensayos de resistencia a compresión se han realizado sobre probetas cúbicas de 100 mm de arista. Los resultados se recogen en el punto 4.4.3 relativo al HAC-C y en el punto 4.4.4 relativo al HAC-R100A y HAC-R100B. Los ensayos son realizados a la edad de 7 y 28 días.

En Tabla 80 se recogen los resultados de todos los ensayos de compresión realizados.

Tabla 80. Resultados de resistencia a compresión.

Probeta	Edad (días)	Resistencia a compresión MPa	Media MPa
HAC-C 1 22/2/22	7	19,92	21,91
HAC-C 2 22/2/22		23,23	
HAC-C 3 22/2/22		22,59	
HAC-R100A 1 2/3/22	7	27,96	27,98
HAC-R100A 2 2/3/22		29	
HAC-R100A 3 2/3/22		27,09	
HAC-R100B 1 2/3/22	7	26,43	27,78
HAC-R100B 2 2/3/22		29,43	
HAC-C 4 22/2/22	28	30,6	35,9
HAC-C 5 22/2/22		37,34	
HAC-C 6 22/2/22		39,81	
HAC-R100A 4 2/3/22		40,43	48,28
HAC-R100A 5 2/3/22		44,35	
HAC-R100A 6 2/3/22		52,22	
HAC-R100B 4 2/3/22		47,39	48,87
HAC-R100B 5 2/3/22		51,02	
HAC-R100B 6 2/3/22		48,14	

En Figuras 4.61, 4.62 y 4.63 se representan gráficas de la evolución de la resistencia a compresión de los HAC fabricados.

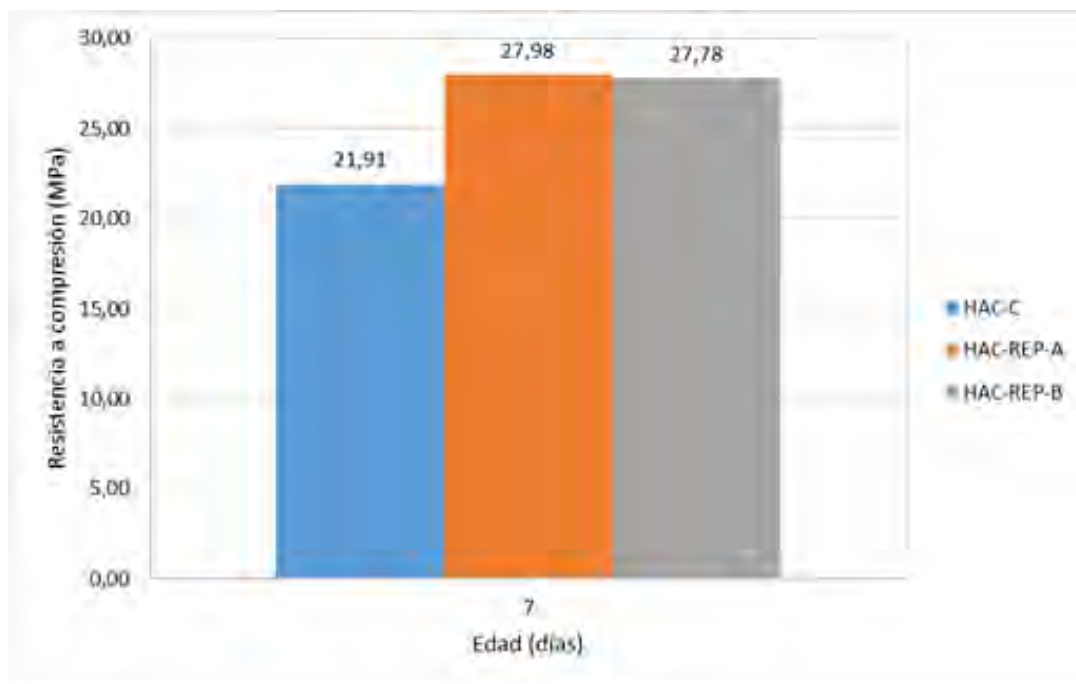


Fig. 4.61 Gráfica de barras de compresión a 7 días.

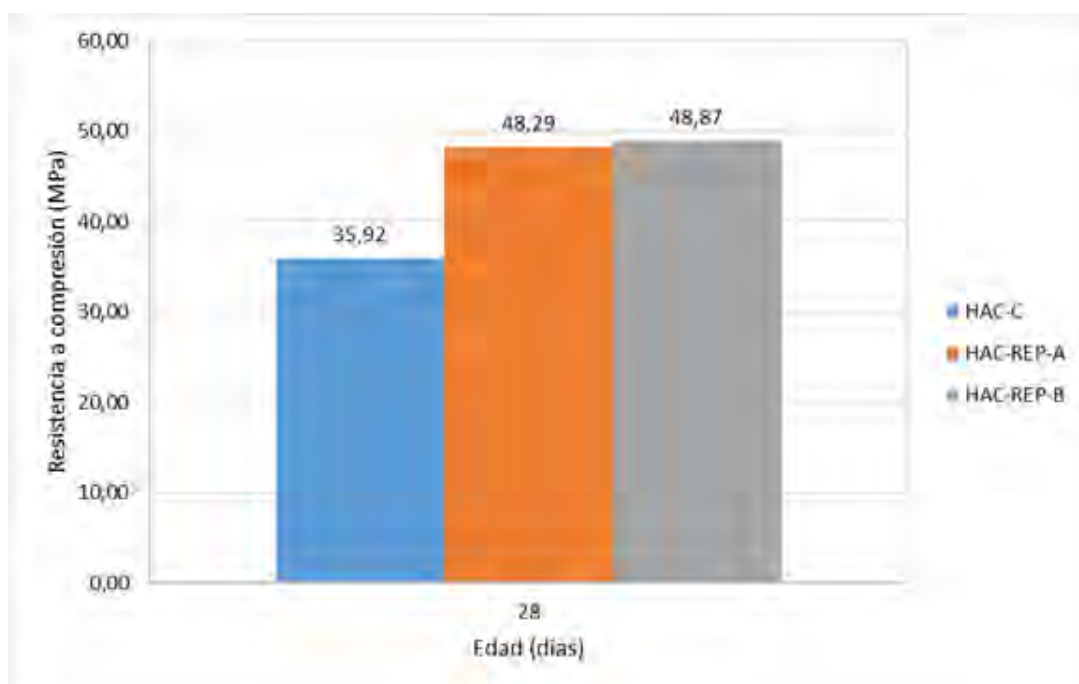


Fig.4.62. Grafica de barras de compresión a los 28 días.

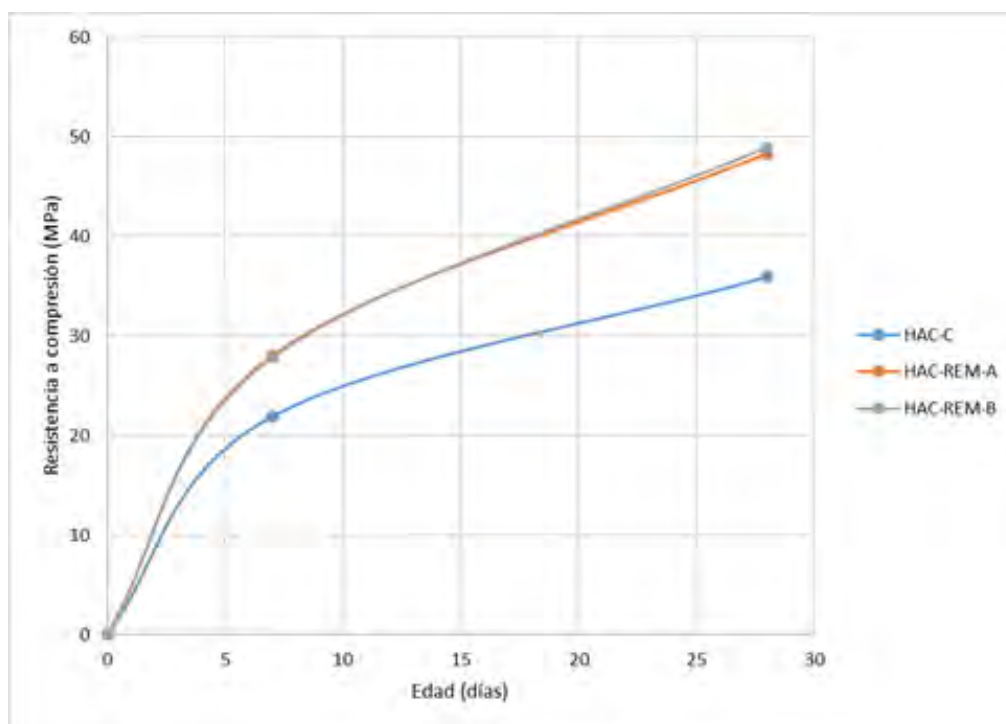


Fig.4.63. Grafica de resistencia a compresión a los 7 y 28 días de los HAC fabricados.

Según los datos recopilados en la Tabla 80 y las graficas de las Figuras 4.61, 4.62 y 4.63; se puede asegurar que las adiciones de RCP como reemplazo del FC mejora las prestaciones mecánicas de resistencia a compresión tanto a los 7 como a los 28 días.

A los 7 días, supone una mejora de resistencia a compresión del 31% de los HAC-R100A y HAC-R100B con respecto al HAC-C; el cual no tiene en su composición RCP. También es de hacer notar que los datos de resistencia a compresión de los HAC-R100A y HAC-R100B a esta edad son muy similares ya que la media es de 27,98 y 27,78 MPa.

A los 28 días esta mejora de resistencia a compresión supone un 35% con respecto al HAC-C; permaneciendo totalmente parecidos los datos obtenidos en las referencias HAC-R100A y HAC-R100B con 48,28 y 48,87 MPa respectivamente.

Como se ha indicado anteriormente esta mejora de las prestaciones mecánicas no cabe duda son debidas a las características del residuo cerámico, el cual aparte de sus características químicas posee una muy importante para obtener estos resultados y es concretamente la cantidad de frita/ kg de RCP siendo dicha cantidad de 874g/kg de residuo o lo que es lo mismo el 87% de residuo es frita cerámica. La frita; como ya vimos en el Capítulo 2 del Estado del Conocimiento es la parte vítrea de un esmalte y se caracteriza por su naturaleza vítrea, su dureza y una elevada resistencia a la compresión. Este dato es muy importante para poder entender los resultados obtenidos.

4.4.5.5. Durabilidad

En este apartado se presentan los resultados relativos a la durabilidad de los HAC fabricados en base a los ensayos de permeabilidad al Oxígeno y al ensayo de penetración de agua bajo presión.

4.4.5.5.1. Permeabilidad al Oxígeno

En este apartado se expone la metodología realizada y los datos relativos al coeficiente de permeabilidad al Oxígeno de los distintos HAC fabricados; estos coeficientes son determinados a diferentes alturas de las probetas cilíndricas normalizadas a los 28 días de edad.

. En primer lugar, se cubren los tercios superior, medio e inferior de las probetas con una fina capa de silicona Figura 4.64



Fig.4.64. Tercios superior, medio e inferior de probeta cilíndrica HAC-C, recubiertos con silicona.

. Se inserta el tercio a ensayar en junta de caucho y el conjunto se coloca en el porta muestras del aparato de ensayo Figura 4.65.



Fig. 4.65. Colocación de junta de caucho terció y colocación del conjunto en aparato de ensayo. LADICIM.

. Con gato hidráulico se cierra el conjunto herméticamente (muestra + porta muestras)
 Figura 4.66



Fig.4.66. Cierre hermético con gato hidráulico. LADICIM.

. Se comienza a meter O_2 con un 1 bar de presión.

- . Se toma la primera lectura del caudalímetro y posteriormente se conecta la salida de Oxígeno del porta muestras inferior. Se deja 30 minutos para estabilizar el caudal.
- . Pasado el tiempo de 30 minutos tomamos lectura del caudal. Figura 4.63. Posteriormente subimos la presión de Oxígeno a 1,5 y 2 bar respectivamente y seguiremos tomando datos cada 30 segundos. Figura 4.67
- . Todas estas operaciones se repetirán con cada tercio de los distintos HAC fabricados.



Fig.4.67. Aparato de ensayo montado y caudalímetro. LADICIM.

En Tabla 81 se muestran los resultados de los ensayos de permeabilidad realizados a cada tercio de los HAC-C; HAC-R100A y HAC-R100B.

Tabla 81. Resultados de ensayos de permeabilidad al Oxígeno.

Q (cc/s)	Valor inicial	Caudal corregido	P (bar)	Probeta	D (m)	Altura (m)	Área (m2)	K_{O_2}	Promedio (K_{O_2})
0,055	-0,006	0,061	1	HAC-C ↑	0,15	0,08	0,0177	3,72E-17	3,89E-17
0,115	-0,009	0,124	1,5		0,15	0,08	0,0177	4,31E-17	
0,174	-0,008	0,182	2		0,15	0,08	0,0177	4,06E-17	
0,185	-0,008	0,193	1	HAC-C →	0,15	0,078	0,0177	1,15E-16	7,21E-17
0,089	-0,008	0,097	1,5		0,15	0,078	0,0177	3,29E-17	
0,124	-0,008	0,132	2		0,15	0,078	0,0177	2,94E-17	
0,061	-0,007	0,068	1	HAC-C ↓	0,15	0,083	0,0177	4,30E-17	4,26E-17
0,111	-0,007	0,118	1,5		0,15	0,083	0,0177	4,26E-17	
0,173	-0,005	0,178	2		0,15	0,083	0,0177	4,22E-17	
0,007	-0,002	0,009	0,98	HAC-R100A ↑	0,15	0,089	0,0177	6,27E-18	5,40E-18
0,015	-0,002	0,017	1,5		0,15	0,089	0,0177	6,58E-18	
0,035	-0,003	0,038	2		0,15	0,089	0,0177	9,66E-18	
0,006	-0,001	0,007	1	HAC-R100-A →	0,15	0,085	0,0177	4,53E-18	2,91E-18
0,038	0,001	0,037	1,5		0,15	0,085	0,0177	1,37E-17	
0,012	0,001	0,011	2		0,15	0,085	0,0177	2,67E-18	
0,003	0,001	0,002	1	HAC-R100A ↓	0,15	0,085	0,0177	1,30E-18	6,96E-18
0,032	0,001	0,031	1,5		0,15	0,085	0,0177	1,15E-17	
0,015	0,001	0,014	2		0,15	0,085	0,0177	3,40E-18	
0,019	0,001	0,018	1	HAC-R100B ↑	0,15	0,092	0,0177	1,26E-17	1,24E-17
0,063	0,001	0,062	1,5		0,15	0,092	0,0177	2,48E-17	
0,047	0,001	0,046	2		0,15	0,092	0,0177	1,21E-17	
0,008	-0,001	0,009	0,9	HAC-R100-B →	0,15	0,087	0,0177	6,86E-18	6,04E-18
0,032	0,001	0,031	1,3		0,15	0,087	0,0177	1,44E-17	
0,022	0,001	0,021	2		0,15	0,087	0,0177	5,22E-18	
0,007	0,002	0,005	1	HAC-R100-B ↓	0,15	0,083	0,0177	3,16E-18	3,83E-18
0,011	-0,001	0,012	1,5		0,15	0,083	0,0177	4,34E-18	
0,02	0,001	0,019	2		0,15	0,083	0,0177	4,51E-18	

Según los resultados obtenidos, se puede observar que los HAC menos permeables corresponden a los que contienen RCP como reemplazo de FC es decir a los HAC-R100A cuyo índice de permeabilidad tiene un orden de magnitud de $10^{-18}m^2$ y al HAC-R100B cuyo índice es de 10^{-17} y $10^{-18}m^2$. Sin embargo, el HAC-C tiene un índice de permeabilidad con un orden de magnitud de $10^{-17}m^2$; por lo cual es mucho más permeable; del orden de 10 veces mayor. A estos dos hormigones; HAC-R100A y HAC-R100B, se les puede considerar como de baja permeabilidad.

También es necesario comentar que los materiales con menor permeabilidad coinciden con los de menor % de porosidad en los ensayos realizados de caracterización física y sin duda es debido a las características del residuo cerámico.

4.4.5.5.2. Penetración de agua bajo presión

En este apartado se exponen la metodología del ensayo realizado y los resultados obtenidos, los cuales han sido determinados a diferentes alturas de las probetas cilíndricas normalizadas. Estas diferentes alturas se refieren a los tercios superior, medio e inferior de los HAC-C, HAC-R100A y HAC-R100B.

El método utilizado ha sido el siguiente:

. Montamos el dispositivo de ensayo con el tercio de la probeta correspondiente, encima de ella una junta de goma y una celda de metacrilato donde posteriormente es introducido el agua que estará en contacto con el hormigón a ensayar; de nuevo se coloca una junta de goma para asegurar la posterior estanqueidad. Todo ello se culmina con una tapa superior de akulón, por donde se introduce el agua y a través de la cual se mete el aire comprimido. En Figura 4.68 se muestra el montaje de la probeta de ensayo.



Fig.4.68. Montaje de probeta a ensayar. LADICIM.

. Posteriormente se colocan los distintos montajes de probetas en bancada y mediante un fuerte apriete se garantiza el mantenimiento de la estanqueidad del conjunto. Posteriormente se conecta el aire comprimido a una presión de 5 bar y se mantiene

durante 72 horas el ensayo. En Figura 4.69 se muestra el montaje en la bancada de ensayo.



Fig. 4.69. Montaje de las probetas en bancada de ensayo. LADICIM.

. Pasadas 72 horas, se desconecta y desmonta el ensayo, sometiendo cada tercio ensayado a rotura longitudinal por el método brasileño. En Figura 4.70 se observa la gráfica de barras con las huellas medias de las penetraciones de agua en el HAC-C; HAC-R100A y HAC-R100B y en Figuras 4.71, 4.72 y 4.73 se observan las huellas máximas obtenidas. En Tabla 82 se deja constancia de los resultados obtenidos tras el ensayo de permeabilidad a los gases.

Tabla 82. Resultados de ensayo de penetración de agua bajo presión.

Referencia	Tercio	Huella máxima (mm)	Huella media (mm)
HAC-C	↑	80	80,33
	→	78	
	↓	83	
HAC-R100A	↑	27,79	23,89
	→	21,44	
	↓	22,46	
HAC-R100B	↑	25,78	21,56
	→	19,31	
	↓	19,59	

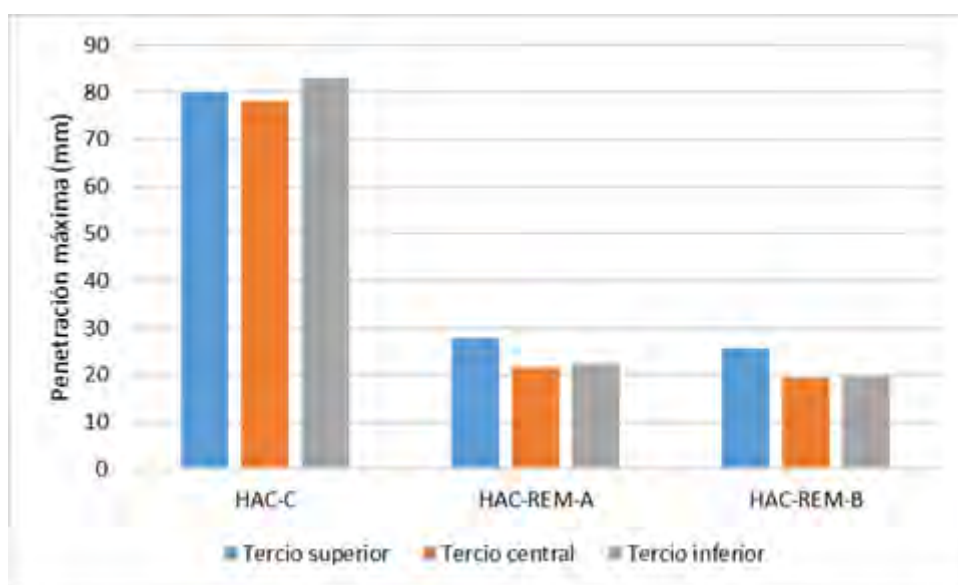


Fig.4.70. Diagrama de huellas medias de penetración de agua bajo presión.



Fig. 4.71. Huellas de penetración máxima en HAC-C.

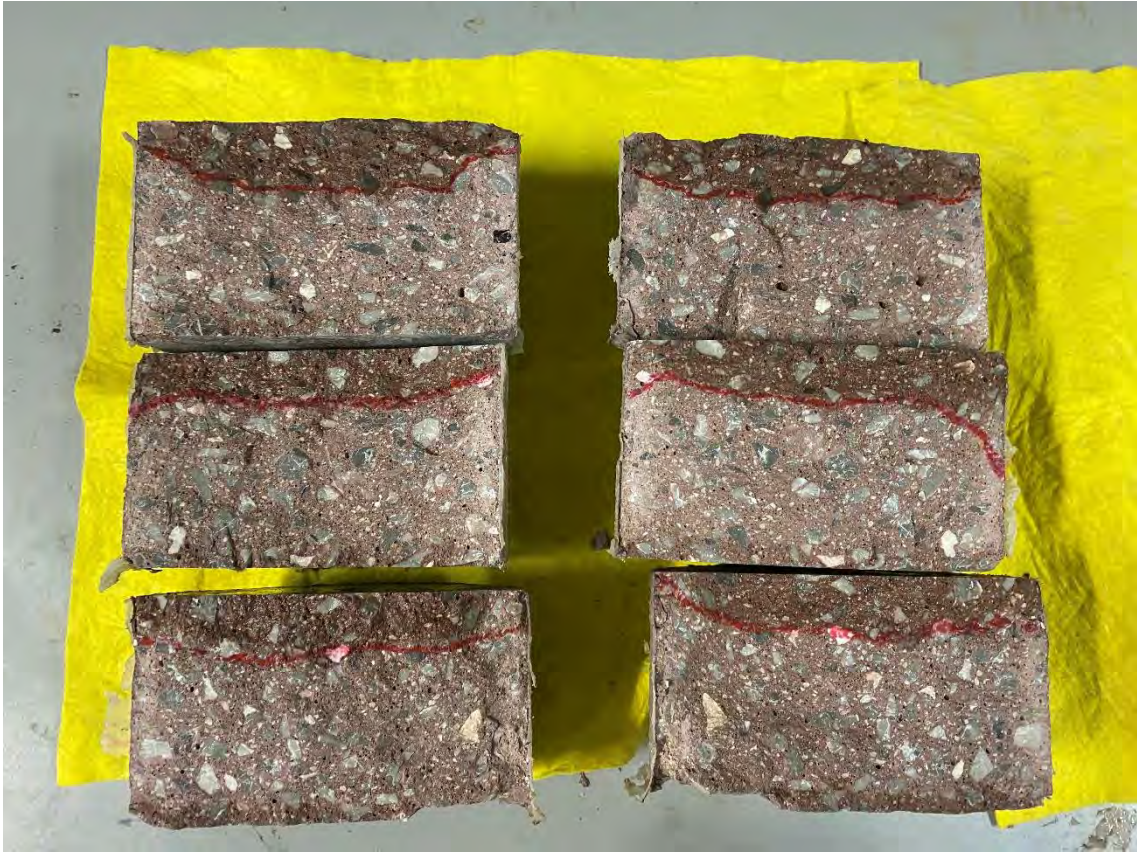


Fig. 4.72. Huellas de penetración máxima en HAC-R100A.





Fig. 4.73. Huellas de penetración máxima en HAC-R100B.

A la vista de la Tabla 82; el hormigón menos permeable es el HAC-C (no tiene RCP) mientras que los más permeables son por este orden el HAC-R100B y el HAC-R100A, con una gran disminución de la permeabilidad; sin duda originada por la adición de RCP como reemplazo de FC.

Ambos hormigones; HAC-R100A y HAC-R100B, se les puede catalogar como suficientemente impermeables puesto que el valor máximo de penetración de agua bajo presión exigido a un hormigón estructural es de 50mm y la media de estos dos hormigones es de 23,89 y 21,56mm respectivamente, lo cual permite su exposición incluso a ambientes agresivos. Dichos limites se reflejan en las Figuras 4.71; 4.72 y 4.73 mediante líneas rojas.

Como conclusión definitiva de la durabilidad, podemos afirmar que el RCP utilizado como reemplazo de FC mejora las prestaciones de permeabilidad a los gases y de penetración de agua bajo presión.

4.5. Utilización del RCP como materia prima en la fabricación de Clinker de cemento Portland

Como se indicó en el punto 3.7 del Capítulo 3; se entregaron muestras del RCP a la empresa CEMENTO PORTLAND VALDERRIBAS en su fábrica ubicada en Mataporquera con objeto de que se pudiera evaluar de forma práctica o teórica si el RCP es compatible con su fabricación de Clinker, como materia prima.

La evaluación se ha realizado teóricamente, tanto por el Departamento de Calidad como por el de Investigación, en función de los análisis químicos aportados del RCP.

Como norma general utilizada en la fábrica de Mataporquera; cualquier producto que tenga muchos álcalis, mucho cloro (limitado por norma en el cemento), mucho magnesio (limitado por norma en el Clinker), muchos halógenos o azufre (estos dan muchos problemas en el proceso productivo) son indeseables en cualquier producto que se intente utilizar como materia prima de producción de crudo (lo que se mete en el horno para producir Clinker).

El RCP, objeto de este trabajo de investigación, podría ser válido, como materia prima de crudo si los contenidos de álcalis Na_2O y K_2O (11% y 5% respectivamente) fueran muy inferiores ya que el cemento que fabrican debe contener como máximo un 0,75% expresado en álcalis equivalentes.

Los altos contenidos de óxidos de Na y de K; son muy perjudiciales tanto en el % de álcalis del Clinker a fabricar, pero sobre todo originan muchos problemas en el proceso productivo debido a que originan atascos en el intercambiador de calor previo a la entrada del horno.

En base a lo expuesto; el RCP no podrá ser utilizado como materia prima de crudo de fabricación de Clinker de cemento Portland.

Capítulo 5. Conclusiones y futuras líneas de investigación

En este capítulo se describen las conclusiones derivadas del trabajo de investigación realizado, basado en la reutilización de residuos cerámicos en la fabricación de morteros convencionales, morteros autonivelantes, hormigones autocompactantes y en la reutilización del residuo cerámico como materia prima en la fabricación de Clinker de cemento Portland. También, para finalizar este capítulo se proponen tareas que pueden completar el camino iniciado en esta investigación.

5.1. Conclusiones

En este trabajo (TFP) se demuestra que la incorporación de residuo cerámico procedente de la fabricación de menaje de cocina y paneles de arquitectura, que actualmente es gestionado como un residuo mediante su confinamiento en vertedero, puede ser muy aprovechable mediante su utilización en diferentes mezclas utilizadas en la construcción ya que en algunas composiciones mejora las prestaciones técnicas.

Los resultados experimentales demuestran de forma clara que es viable confeccionar morteros autonivelantes y hormigones autocompactantes con características adecuadas tanto en estado fresco como endurecido.

Las conclusiones, vamos a ir haciéndolas en función de los temas investigados:

- . **Residuo cerámico.**
- . **Morteros convencionales.**
- . **Morteros autonivelantes.**
- . **Hormigones autocompactantes.**
- . **Sustitutivo de materias primas en la fabricación de Clinker de cemento Portland.**

5.1.1. Conclusiones referentes al estudio del residuo cerámico RCP

*El RCP utilizado en esta investigación, ya se vio que su análisis químico presentaba altos valores de SiO_2 (56-58%), Na_2O (11%), Al_2O_3 (6%), K_2O (5%) y otros óxidos con menor carga cuantitativa como los de P, Ca, Fe, Mn y Ti. También es una cualidad importante y específica de este residuo, el alto contenido de B expresado como B_2O_3 (13,5%).

*A pesar de la importancia que tiene la caracterización química del RCP; se debe hacer especial énfasis en la caracterización de la parte vítrea del RCP. Esta parte vítrea representa el 87,4% del RCP; es decir por cada kg de RCP existen 874 g de frita.

La frita, como ya vimos en el Capítulo 2 del Estado del Conocimiento, es la parte vítrea de un esmalte y se caracteriza por su naturaleza vítrea, su dureza y una elevada resistencia a compresión. Este dato es muy importante para poder entender posteriormente las conclusiones que se expondrán.

*Otro dato importante que caracteriza al residuo es su elevada superficie específica Blaine ($5320 \text{ cm}^2/\text{g}$) lo cual nos indica una finura mayor aún que el cemento Portland.

5.1.2. Conclusiones relativas a los morteros convencionales usando como reemplazo de cemento Portland el RCP.

Los reemplazos han sido del 5,10,15,20,25,50 y 75 %.

En estado fresco

*Las diferentes muestras van tomando el color del RCP a medida que aumentamos el % del residuo usado como reemplazo.

*En las probetas desmoldeadas, su estado de dureza es bueno hasta la muestra de reemplazo del 25%. En las muestras de 50 y 75% el estado de dureza es muy deficiente.

En estado endurecido

*Se ve claramente la tendencia de una disminución de las resistencias mecánicas, tanto a flexión como a compresión a los 7 y 28 días de edad. Esta disminución de las propiedades mecánicas son mayores a medida que aumentamos el % de reemplazo de cemento por RCP.

*** El RCP no desarrolla actividad puzolánica ya que no se hidrata y se comporta como un residuo inerte**

***Claramente se ve tras los ensayos realizados, que el RCP no se puede aportar como reemplazo de cemento Portland.**

5.1.3. Conclusiones relativas a la fabricación de morteros autonivelantes empleando RCP como reemplazo de FC

Estos morteros especiales, se componen de cemento Portland, arena de sílice, filler calizo (FC) con tamaño de grano $\leq 100\mu\text{m}$, agua y aditivos. En esta fase experimental se va a ir sustituyendo FC por reemplazo de RCP al 25;50 y 100% en las dosificaciones correspondientes.

En estado fresco

* Una vez conseguida la dosificación patrón sin RCP, con un adecuado escurrimiento; las dosificaciones con RCP al 25; 50 y 100% de reemplazo del FC se ajustan para obtener un escurrimiento en torno a 300mm. Esto se consigue variando la cantidad de agua ya que el residuo cerámico absorbe más agua que el FC durante el amasado.

* Una vez desmoldeadas las probetas se ve que las dosificaciones de 25; 50 y 100% de RCP han endurecido de forma similar que la que no tiene RCP o mortero autonivelante patrón con FC.

* Igualmente, las probetas de los morteros autonivelantes confeccionados van tomando el color rojizo del RCP a medida que aumentamos el % de reemplazo.

En estado endurecido

- * Los ensayos de rotura a flexión tanto a los 7 días como a los 28 días de edad van mejorando sus resultados a medida que aumentamos el % de RCP en sustitución de FC. Este aumento de resistencia a flexión es del 32 al 44% con relación al mortero patrón a los 7 días de edad y del 23 al 92% a los 28 días de edad; también con relación al mortero autonivelante patrón.
- * También se observa en la sección de las probetas rotas a flexión que a medida que aumentamos el % de RCP, la sección es menos porosa y más compacta.
- * Los ensayos de rotura a compresión siguen la misma tendencia de aumentar la resistencia de rotura a medida que aumentamos el % de RCP en sustitución del FC. A los 7 días de edad, este aumento de resistencia a la compresión es del 46; 62 y 67% en los reemplazos de 25; 50 y 100% de RCP con relación al mortero autonivelante patrón de 0% de RCP.
- * Similares datos se obtienen a los 28 días, con resultados aún mayores con relación al mortero patrón ya que los incrementos de resistencia de rotura a compresión son del 75; 111 y 122% en los reemplazos de 25; 50 y 100% de RCP.
- * **Con estas conclusiones queda demostrado que el RCP es totalmente válido para usarlo como adición de reemplazo del FC en morteros autonivelantes ya que no afecta a las propiedades exigidas de escurrimiento y mejora sustancialmente las características mecánicas de estos morteros autonivelantes.**

5.1.4. Conclusiones relativas a los hormigones autocompactantes empleando RCP como adición de reemplazo de FC

Estos HAC se diseñan en base al empleo de cemento Portland, áridos gruesos y finos, adiciones de FC, reemplazo de FC por RCP al 100%, agua y aditivo plastificante.

En estado fresco

- * Una vez obtenida la dosificación del hormigón autocompactante patrón HAC-C y comprobados los parámetros de caracterización (SF, T_{500} , PL y PJ) se procede a la dosificación del HAC-R100 teniendo en cuenta que el RCP tiene una granulometría muy inferior al FC y se debe compensar esa diferencia de finura para evitar problemas de resistencia mecánica y de durabilidad. Para aminorar esa diferencia de partículas entre el FC y el RCP, sólo se reemplaza el FC en un 95% por el RCP; aportando el 5% restante la ASI de árido fino 0/1mm.
- * Al hacer la dosificación variando la cantidad de agua, se da origen a las versiones HAC-R100A y HAC-R100B, en función de los parámetros de caracterización del material amasado. Estas dos variantes, varían en sus dosificaciones ya que, al variar la cantidad de agua, varían también el resto de la dosificación de los otros componentes.
- * Las variaciones de la relación en peso de agua /cemento han sido de 0,58 en el HAC-C a 0,66 y 0,78 respectivamente en el HAC-R100A y HAC-R100B.

- * El HAC-R100B cumple con todos los requisitos de caracterización exigibles.
- * Tanto el HAC-C como los HAC-R100A y HAC-R100B no muestran signos de segregación.
- * Los HAC-R100A y HAC-R100B toman el color rojizo del RCP.

En estado endurecido

Aspecto

- * El acabado superficial de los tres HAC fabricados es bueno si bien el HAC-c presenta más cantidad de poros de burbujas de aire atrapado que las referencias HAC-R100A y HAC-R100B por lo cual la adición del RCP parece que mejora este aspecto.
- * La distribución interna, observada en los cortes transversales de las probetas cilíndricas normalizadas, es homogénea y sin la existencia de signos de segregación.

Propiedades físicas

- * En base a los resultados obtenidos podemos afirmar que la incorporación del RCP genera un incremento de densidad con respecto al hormigón sin RCP.
- * La porosidad de los hormigones con RCP es mucho menor que en el HAC-C, con disminuciones del 83% y del 119% respectivamente en el HAC-R100A y en el HAC-R100B. Sin duda, esta disminución del % de porosidad se debe a la propia naturaleza del residuo cerámico.
- * La absorción del HAC-C es semejante a un hormigón convencional; sin embargo, en los hormigones con RCP esta absorción es mucho menor siendo esta disminución del % de absorción del orden del 92 y 138% en los HAC-R100A y HAC-R100B respectivamente.

Propiedades mecánicas

- * La incorporación del RCP como adición de reemplazo de FC mejora el comportamiento mecánico a compresión tanto a los 7 como a los 28 días de edad.
- * A los 7 días esta mejora supone un incremento de la resistencia a compresión del 31% con respecto al patrón HAC-C; exento de RCP. A los 28 días esta mejora supone un incremento de la resistencia a compresión del 35%; también con respecto al HAC-C.
- * No existen diferencias en los valores obtenidos en los HAC-R100A y HAC-R100B tanto a los 7 como a los 28 días ya que las dosificaciones son muy parecidas respecto al RCP.

Durabilidad

- * Los hormigones menos permeables son los que contienen RCP y se les puede considerar de baja permeabilidad. El RCP hace que estos hormigones sean más impermeables; del orden de 10 veces con relación al HAC-C.
- * Respecto a la penetración de agua bajo presión; se puede considerar las referencias HAC-R100A y HAC-R100B como suficientemente impermeables ya que la penetración de

un hormigón estructural convencional es de 50 mm y en los hormigones fabricados con RCP esta penetración es de 23 y 21 mm respectivamente.

Como conclusión definitiva del empleo del RCP en hormigones autocompactantes; se puede afirmar que su utilización mejora sin duda las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad ensayadas.

5.1.5. Conclusiones relativas al estudio de utilización del RCP como sustitutivo de materia prima en la fabricación de Clinker de cemento Portland

Las conclusiones son muy claras y se resume en la siguiente y única conclusión:

***Es totalmente inviable su utilización como materia prima debido al alto contenido del residuo cerámico en Na_2O y K_2O . Esto hace al residuo incompatible con la técnica de fabricación del Clinker ya que estos componentes en elevadas cantidades originan muchos problemas de fabricación en el proceso productivo.**

5.2. Futuras líneas de investigación

Desde el punto de vista de la valorización de este residuo cerámico se pueden proponer algunas líneas de investigación tendentes a buscar otros productos donde puedan emplear este tipo de residuos y afianzar los resultados obtenidos en esta investigación con el firme propósito de fomentar su utilización en materiales de construcción.

* Estudio de viabilidad técnica de estos residuos cerámicos en hormigones de protección neutrónica; debido al alto contenido de B_2O_3 .

* Profundizar en la durabilidad de estos HAC con RCP para asegurar que la adición de este residuo cerámico no presenta ningún efecto nocivo.

* Estudio de viabilidad de la utilización de este residuo cerámico en estado de torta de filtrado. Su composición química y vítrea es la misma que el residuo investigado pero su estado físico hace necesario una operación de molienda para convertirlo en residuo cerámico polvo.

Capítulo 6. Bibliografía

- [1]. Evolución del concepto de Desarrollo Sostenible. Programa Senior. Antonio Rodriguez Ramos. 2020.
- [2]. Introducción al Concepto de Desarrollo Sostenible. Programa Senior. Antonio Rodriguez Ramos. 2020.
- [3]. Elementos básicos del Desarrollo Sostenible. Programa Senior. Antonio Rodriguez Ramos. 2020.
- [4]. Ciencia, Tecnología y Sociedad. Programa Senior. Jorge Cristobal García. 2020.
- [5]. Captura y Valorización de CO₂. Programa Senior. Manuel Álvarez Guerra. 2020.
- [6]. L Vielhaber 1961. Tecnología de los esmaltes. Editorial Reverte.
- [7]. Dr. Fritz Ullmann 1931. Enciclopedia de Química Industrial. Gustavo Gili.
- [8]. Eugenio Gómez Gómez 1988. Esmaltes y esmaltados. Libro de capacitación técnica de esmaltería en GURSA.
- [9]. Eugenio Gómez Gómez 1994. El esmalte y su proceso de molienda.
- [10]. Eugenio Gómez Gómez. 1992. El esmaltado en color y pigmentos empleados. Artículo publicado en la revista <<TECNICA INDUSTRIAL>> del Colegio de Ingenieros Técnicos Industriales de España.
- [11]. OFICEMEN. Agrupación de fabricantes de cementos de España. Disponible en: <https://www.oficemen.com/> [Accedido en Mayo 2021].
- [12]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/cemento>. [Accedido Mayo 2021].
- [13]. Disponible en: <https://ciment-catala.org/cemento/el-cemento-es-vida/> [Accedido en Mayo 2021].
- [14]. OFICEMEN. Informe base de “CRECIMENTA 2030” de OFICEMEN al Ministerio de Industria, Energía y Turismo.
- [15]. Ruth Garcia Calle 2016. Utilización de residuos vitreos en la preparación de pastas y morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente. Comportamiento Reológico y Mecánico. TFG Universidad politecnica de Madrid.
- [16]. Torres Carrasco 2015. Reutilización de residuos vitreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos, activación, comportamiento y durabilidad. Tesis Doctoral. UAM. Madrid.

- [17]. Josefa Fernandez 2021. La Industria Química en Cantabria. Programa Senior. Universidad de cantabria.
- [18]. CIP30. Adiciones al cemento. NRMCA. Disponible en: <https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2020/04/CIP30es.pdf>. [Accedido en Junio 2021].
- [19]. Jose Calleja. Adiciones y cementos con adiciones. IETCC/CSIC Madrid.
- [20]. Real Decreto 256/2016 en el que se desarrolla la Instrucción para la recepción de cementos CR16. Disponible en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-6167. [Accedido Junio 2021].
- [21]. Cementos, morteros y hormigones 3. Morteros y hormigones 1. Juan Antonio Polanco Madrazo, Jesús Setién Marquínez. Universidad de Cantabria
- [22]. Wikipedia. Mortero (construcción). Disponible en <https://es.wikipedia.org/wiki/mortero>. Accedido en Junio 2021.
- [23]. Tecnología de materiales. Jhon Rodriguez Jahuana 2015. Disponible en <https://jhonrodrigueztecml.blogspot.com/2015/10/semana-11-y-12.html>. Accedido en junio 2021
- [24]. Requisitos de los morteros. Disponible en <https://www.concretonline.com/morteros-revoques/requisitos-de-los-morteros>. Accedido en Junio 2021.
- [25]. <https://www.patologiasconstrucción.net/2016/10/la-cal-aplicaciones-1-tipos/>. Accedido en junio 2021.
- [26]. <https://es.wikipedia.org/wiki/Mortero-autonivelante>. Accedido en Julio 2021.
- [27]. Características de los morteros. Disponible en <https://www.cvonstrumatica.com/construpedia/Caracter%C3%ADsticas-de-los-Morteros>. Accedido en Julio 2021.
- [28]. Cementos, morteros y hormigones 4. Morteros y hormigones (2). Juan Antonio Polanco Madrazo, Jesús Setién Marquínez. Universidad de Cantabria.
- [29]. Wikipedia. Concreto. Disponible en <https://es.wikipedia.org/wiki/Concreto>. Accedido en Julio 2021.
- [30]. Israel Sosa Yépez. Tesis Doctoral. Incorporación de escorias siderúrgicas en hormigones autocompactantes de altas prestaciones. Universidad de Cantabria. 2017
- [31]. Temas de Química. Manuel de la Granja Alonso. Editorial Alhambra. 1969.

- [32]. Blindaje de la radiación de neutrones. Disponible en <https://www.radiation-bosimtry.org/es/que-es-el-blindaje-de-la-radiacion-de.neutrones-definicion/>. Accedido en septiembre de 2021.
- [33]. Estudio sobre 5 tipos de hormigón con propiedades especiales. Julen Gonzalez Lara. Trabajo final de Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. 2018.
- [34]. Materiales para la absorción y atenuación de neutrones. Disponible en <https://patentados.com/2013/material-para-la-absorcion-y-atenuacion>. Accedido en octubre 2021.
- [35]. Microanálisis por Dispersión de Energías de Rayos X (XEDS). Conceptos básicos. Servicio de Microscopia Electrónica SCAI Universidad de Málaga. [http:// www.uma.es](http://www.uma.es)
- [36]. Apuntes de electromedicina. Xavier Pardell 2021. <https://www.pardell.es/el-microscopio-electronico-de-barrido-sem.html>
- [37]. Espectroscopia de emisión atómica. Disponible en: es.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia_de_emisi3n_at3mica
- [38]. Norma UNE- EN 206-9. Hormigón. Parte 9. Requisitos adicionales para el hormigón autocompactante (2013).
- [39]. Norma UNE-EN 12350. Ensayos de hormigón fresco.
- [40]. Norma UNE-EN 12350-9. Ensayos de hormigón fresco. Parte 9. Hormigón autocompactante. Ensayo de embudo en V (2011).
- [41]. Norma UNE-EN 12350-10. Ensayos de hormigón fresco. Parte 10. Hormigón autocompactante. Método de la caja en L (2011).
- [42]. Métodos de caracterización de hormigón autocompactante. Capítulo 3. M Bravo Sobrino. ¿Disponible en upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099-1/3358/36022-5.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- [43]. Trabajo Fin de Máster “Influencia de la adición de nano sílice en el hormigón autocompactante” Universidad Politécnica de Madrid. Néstor Eduardo León Brito. Septiembre 2012.
- [44]. Norma UNE-EN 933-3:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos.
- [45]. Practicas de Laboratorio de LADICIM de Materiales de Construcción 1º de Grado en Ingeniería Civil. Granulometría de un árido grueso.

- [46]. Norma UNE-EN 12350-8. Ensayos de hormigón fresco. Parte 8. Hormigón autocompactante. Ensayo de escurrimiento.
- [47]. Norma UNE-EN 12350-12. Ensayos de hormigón fresco. Parte 12. Hormigón autocompactante. Ensayo de escurrimiento con anillo japonés.
- [48]. Norma UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3. Determinación resistencia a compresión de probetas.
- [49]. Practicas de Laboratorio de LADICIM de Materiales de Construcción 2º de Grado de Ingeniería Civil. Profundidad de penetración del agua.
- [50]. Tesis Doctoral “Hormigón reciclado de aplicación estructural” Carlos Thomas García.
- [51]. Norma UNE-EN 83966:2008. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Acondicionamiento de probetas de hormigón para los ensayos de permeabilidad a gases y capilaridad.
- [52]. Norma UNE-EN 83981:2008. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al oxígeno del hormigón endurecido.
- [53]. Carlos Thomas García, Juan Antonio Polanco Madrazo, Jesús Setién Marquínez. Caudalímetro para determinar la permeabilidad de un material a un gas, P201300197(2012).
- [54]. Norma Une-EN 12390-8:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8. Profundidad de penetración de agua bajo presión.

Índice de Ilustraciones

Figura 1.1. Pilares del desarrollo sostenible.	1
Figura 1.2. Objetivos del desarrollo sostenible.	2
Figura 1.3. Esquema de Economía Circular.	3
Figura 1.4. Jerarquía de Gestión de Residuos.	4
Figura 2.1. Menaje de cocina fabricado por VITRINOR.S.A.L.	10
Figura 2.2. Paneles de estación de ferrocarril.	10
Figura 2.3. Paneles de túnel de carretera.	10
Figura 2.5. Escamas de fritas.	11
Figura 2.6. Esquema de diferentes clases de fritas.	11
Figura 2.7. Tipos de aguas para el esmaltado.	13
Figura 2.8. Colores espectrales.	17
Figura 2.9. Puntos para tener en cuenta al formular un esmalte.	18
Figura 2.10. Proceso de carga, molienda y descarga de un esmalte.	22
Figura 2.11. Fases del proceso de esmaltado.	23
Figura 2.12. Etapas del tratamiento de superficie.	24
Figura 2.13. Técnicas de esmaltado.	24
Figura 2.14. Distribución de pérdidas de esmalte en la aplicación por proyección.	26
Figura 2.15. Estado de piezas en mufla de horno de vitrificado.	27
Figura 2.16. Curva de vitrificado.	28
Figura 2.17. Proceso de vitrificado de chapa de acero.	29
Figura 2.18. Sala de molinos y arqueta de recogida de aguas.	31
Figura 2.19. Filtro de mangas.	32
Figura 2.20. Big-Bag con residuos cerámicos en polvo.	33
Figura 2.21. Piscinas de decantación.	33
Figura 2.22. Filtro prensa y residuo en forma de tortas de filtrado.	34
Figura 2.23. Esquema de generación de residuos.	35
Figura 2.24. Cuantificación de residuos generados.	36

Figura 2.26. Panteón de Roma.	37
Figura 2.27. Puente de hormigón.	38
Figura 2.28. Subproductos industriales reciclados en cementeras.	41
Figura 2.29. Ubicación de las cementeras en España y evolución De producción y consumo.	42
Figura 2.30. Contribución al entorno de una fábrica de cemento.	42
Figura 2.31. Producción de cemento a nivel mundial en 2018.	44
Figura 2.32. Proceso de producción de cemento.	44
Figura 2.33. Precalentador de ciclones.	47
Figura 2.34. Esquemas de reacciones en función de las temperaturas.	47
Figura 2.35. Lava de Clinker.	48
Figura 2.36. Clinker a la salida del enfriador.	49
Figura 2.37. Molino tubular de bolas.	50
Figura 2.38. Explotación de una cantera de Cementos Portland Valderribas.	51
Figura 2.39. Proceso de fabricación de 1000 k de cemento.	52
Figura 2.40. Clasificación de adiciones de cemento.	55
Figura 2.41. Ejemplo de utilización de mortero.	60
Figura 2.42. Mortero de cal.	63
Figura 2.43. Mortero de yeso.	63
Figura 2.44. Mortero de cemento Portland.	64
Figura 2.45. Mortero autonivelante.	66
Figura 2.46. Mesa de sacudidas y molde.	66
Figura 2.47. Torta antes y después del escurrimiento.	67
Figura 2.48. Ensayos de flexión y compresión.	68
Figura 2.49. Ensayo de adherencia mortero endurecido.	68
Figura 2.50. Fisuras de retracción plástica.	69
Figura 2.51. Dosificación básica de mortero.	70
Figura 2.52. Amasadora de laboratorio.	71
Figura 2.53. Diferencia entre mortero y hormigón.	74

Figura 2.54. Esquema cualitativo componentes de hormigón.	74
Figura 2.55. Esquema cuantitativo componentes de un hormigón.	75
Figura 2.56. Tipos de esfuerzos.	75
Figura 2.57. Variación de resistencia a compresión del hormigón con edad.	77
Figura 2.58. Hormigones aligerados.	78
Figura 2.59. Hormigón ciclópeo.	79
Figura 2.60. Hormigón refractario.	80
Figura 2.61. Hormigón armado.	80
Figura 2.62. Hormigón pretensado.	81
Figura 2.63. Hormigón postensado.	82
Figura 2.64. Hormigón reforzado con fibras.	83
Figura 2.65. Hormigón de alta resistencia.	84
Figura 2.66. Diferencia entre hormigón convencional y autocompactante.	85
Figura 2.67. Tipos de áridos según su procedencia.	87
Figura 2.68. Cantera, áridos de machaqueo y de cantos rodados.	87
Figura 2.69. Áridos artificiales.	88
Figura 2.70. Áridos reciclados.	88
Figura 2.71. Cono de Abrams.	91
Figura 2.72. Mesa de sacudidas.	92
Figura 2.73. Ensayos de permeabilidad y probetas ensayadas.	93
Figura 2.74. Ensayos de resistencia a compresión.	94
Figura 2.75. Marie e Irene Curie.	95
Figura 2.76. Espectro electromagnético.	96
Figura 2.77. Iones e Isótopos.	97
Figura 2.78. Radiaciones ionizantes.	98
Figura 2.79. Reacción de fisión nuclear en cadena.	100
Figura 2.80. Moderación de neutrones.	100
Figura 2.81. Reactor nuclear.	102
Figura 2.82. Colemanita.	103

Figura 2.83. Fritas de boro.	103
Figura 2.84. Ulexita.	104
Figura 3.1. Esquema de aguas con sólidos en suspensión	108
Figura 3.2. Piscinas de decantación.	108
Figura 3.3. Instalación de filtros prensa.	108
Figura 3.4. Tortas de residuo cerámico.	109
Figura 3.5. Esquema de recogida de residuo cerámico procedente De la aplicación y elaboración de esmalte.	109
Figura 3.6. Filtros de mangas.	110
Figura 3.7. Residuo cerámico polvo.	110
Figura 3.8. Residuos cerámicos en sus tres estados físicos.	110
Figura 3.9. Cemento CEM I 52,5 R.	112
Figura 3.10. Arena de sílice grano máximo 2mm.	113
Figura 3.11. Residuo cerámico polvo.	113
Figura 3.12. Mufla de LADICIM.	113
Figura 3.13. Arena caliza 0-2mm.	113
Figura 3.14. Gravilla caliza 0-6mm.	113
Figura 3.15. Gravilla caliza 6-12mm.	113
Figura 3.16. Gravilla caliza 12-18mm.	113
Figura 3.17. Aditivo superplastificante.	114
Figura 3.18. Choque de electrones con la materia.	115
Figura 3.19. Espectro Rayos X con picos de diferentes energías.	116
Figura 3.20. Microscopio electrónico de barrido (SEM).	117
Figura 3.21. Composición de elementos de muestra 1 polvo cerámico.	118
Figura 3.22. Microfotografía de una partícula de residuo cerámico.	118
Figura 3.23. Espectro energético detectado de muestra 1 de polvo cerámico.	118
Figura 3.24. Microondas de digestión ácida.	121
Figura 3.25. Vasos de digestión y rotor.	121
Figura 3.26. Espectrómetro de Emisión MP-AES 4200 Marca Agilent.	122

Figura 3.27. Estufa, balanza y desecador.	123
Figura 3.28. Picnómetro de Le Chatelier y balanza.	124
Figura 3.29. Barbotina de residuo polvo cerámico.	127
Figura 3.30. Cono de Bayer y tamizado.	127
Figura 3.31. Decantación de partículas de frita.	128
Figura 3.32. Frita del residuo cerámico y de un esmalte virgen.	128
Figura 3.33. Microfotografías en microscopio óptico.	129
Figura 3.34. Pesado de agua (250 g) y arena de sílice de grano máximo 2mm (1500 g).	132
Figura 3.35. Pesado de cemento CEM I 52,5 R en ME-0.	132
Figura 3.36. Cemento CEM I 52,5 R (375 g) y residuo cerámico (125 g) en muestra ME-25.	132
Figura 3.37. Componentes de morteros convencionales ME-0 y ME-25.	133
Figura 3.38. Componentes de morteros convencionales ME-50 y ME-75.	133
Figura 3.39. Molde normalizado 4x4x16 cm.	134
Figura 3.40. Molde al 50% de llenado; sin y con vibración.	134
Figura 3.41. Molde al 100% sin y con vibración.	134
Figura 3.42. Probetas conservadas en agua.	135
Figura 3.43. Prensa ZWICK-ROELL Z-100.	136
Figura 3.44. Prensa INSTRON.	136
Figura 3.45. Utillaje de ensayo de rotura a flexión.	137
Figura 3.46. Prensa con probeta y útil de ensayo de rotura a flexión.	137
Figura 3.47. Útil de ensayo de rotura a compresión.	138
Figura 3.49. Amasado con 0% de residuo cerámico (izquierda) y con 100% de residuo cerámico.	142
Figura 3.50. Mesa de sacudidas utilizada en el ensayo.	143
Figura 3.51. Torta con 25% residuo cerámico (310-300mm) y con 50% de residuo cerámico (300-295mm).	144
Figura 3.52. Moldeado de dosificación del 25%; 50% y 100% de	144

residuo cerámico.

Figura 3.53. Probetas desmoldeadas.	145
Figura 3.54. Áridos empleados.	147
Figura 3.55. Cemento, adiciones finas y aditivo plastificante.	148
Figura 3.56. Permeabilímetro de Blaine.	150
Figura 3.57. Ficha ensayo de permeabilidad Blaine del residuo cerámico.	152
Figura 3.58. Ficho ensayo de permeabilidad Blaine del filler calizo.	153
Figura 3.59. Tamices serie UNE.	155
Figura 3.60. Tamizadora de vaivén para análisis granulométrico.	155
Figura 3.61. Curva granulométrica de arena de sílice 0/1mm.	157
Figura 3.62. Curva granulométrica de arena caliza 0/4mm.	158
Figura 3.63. Curva granulométrica arena caliza 4/16mm.	159
Figura 3.64. Gráficas granulométricas.	159
Figura 3.65. Amasadoras empleadas en el amasado del HAC.	161
Figura 3.66. Croquización y útil empleado en la caja en L.	163
Figura 3.67. Embudo en V.	164
Figura 3.68. Cono de Abrams y placa de escurrimiento.	165
Figura 3.69. Anillo japonés.	167
Figura 3.70. Esquema alturas de anillo japonés.	168
Figura 3.71. Probetas cúbicas y cilíndricas.	169
Figura 3.72. Esquema de corte de probetas cilíndricas normalizadas.	169
Figura 3.73. Aspecto del despiece de probetas cilíndricas normalizadas de hormigón.	170
Figura 3.74. Medios utilizados ensayo de la densidad en estado endurecido.	171
Figura 3.75. Prensa utilizada para los ensayos de rotura a compresión marca SUZPECAR Mod CME 150/20. LADICIM.	172
Figura 3.76. Aspecto de probeta cúbica sometida al ensayo de compresión.	172
Figura 3.77. Dispositivo experimental para ensayo de penetración de agua bajo presión.	174

Figura 3.78. Detalle del perfil de penetración.	174
Figura 3.79. Dispositivo realización ensayo de permeabilidad al oxígeno.	176
Figura 3.80. Caudalímetro digital para determinar el flujo de oxígeno a la salida de la muestra.	176
Figura 4.1. Variación de color de muestras de mortero convencional.	180
Figura 4.2. Aspecto de las muestras ME-50 y ME-75.	180
Figura 4.3. Rotura a flexión 7 días ME-0, ME-50 y ME-75.	180
Figura 4.4. Rotura a compresión 7 días ME-0, ME-50 y ME-75.	183
Figura 4.5. Rotura a compresión de todas las probetas a 28 días.	185
Figura 4.6. Grafica de valores de flexión vs reemplazo.	186
Figura 4.7. Grafica de valores a compresión vs reemplazo.	186
Figura 4.8. Variación de los colores de los morteros autonivelantes.	187
Figura 4.9. Rotura a flexión a 7 días de referencias 0%; 25%;50% y 100%.	189
Figura 4.10. Rotura a compresión 7 días referencias 0%; 25%; 50% y 100%.	189
Figura 4.11. Probeta de ensayo de rotura a flexión de referencia 25% de residuo cerámico con impurezas.	190
Figura 4.12. Probetas de rotura a compresión a 28 días de todas las referencias.	191
Figura 4.13. Graficas de rotura a flexión a 7 y 28 días.	192
Figura 4.14. Grafica de rotura a compresión a 7 y 28 días.	193
Figura 4.15. Hormigonera de 100 l. Parte exterior e interior. LADICIM.	195
Figura 4.16. Carga de cemento y agua en hormigonera.	196
Figura 4.17. Estado del HAC-C amasado en interior de hormigonera.	196
Figura 4.18. Ensayo de cono de Abrams de HAC-C.	197
Figura 4.19. Ensayo de caja en L del HAC-C.	197
Figura 4.20. Ensayo de anillo japonés del HAC-C.	198
Figura 4.21. Peso del HAC-C en probeta cilíndrica.	199
Figura 4.22. Probetas desmoldeadas.	200
Figura 4.23. Probeta cilíndrica seccionada a la mitad.	200
Figura 4.24. Ensayo de compresión a 4 días de edad de HAC-C.	201

Figura 4.25. Materiales y pesado del agua para 85 l de HAC-C.	203
Figura 4.26. Amasadora de 200 l.	203
Figura 4.27. Muestra de 3 minutos de amasado del HAC-C.	204
Figura 4.28. Muestra de 16 minutos de amasado HAC-C.	205
Figura 4.29. Ensayo de escurrimiento de HAC-C.	205
Figura 4.30. Ensayo de caja en L de HAC-C.	206
Figura 4.31. Ensayo de embudo en V de HAC-C.	207
Figura 4.32. Ensayo anillo japonés de HAC-C.	208
Figura 4.33. Moldeado de probetas HAC-C.	209
Figura 4.34. Desmoldeado de probetas y cámara de humedad.	209
Figura 4.35. Rotura de probetas a compresión a los 7 días de HAC-C.	211
Figura 4.36. Rotura de probetas a compresión a los 28 días de HAC-C.	212
Figura 4.37. Graficas granulométricas de FC y RCP.	213
Figura 4.38. Grafica granulométrica de RCP y la combinación de RCP+ ASI.	214
Figura 4.39. Muestra de HAC-R100 con la mitad de agua y 3 minutos de amasado.	215
Figura 4.40. Muestra de HAC-R100 y HAC-C.	215
Figura 4.41. Muestra del HAC-R100 con toda el agua añadida.	216
Figura 4.42. Probetas moldeadas y desmoldeadas del HAC-R100A.	218
Figura 4.43. Diferencia de color entre el HAC-C y HAC-R100A.	219
Figura 4.44. HAC-R100B recién moldeado y desmoldeado.	220
Figura 4.45. Probetas de HAC-R100A y HAC-R100B para ensayos a 7 días.	221
Figura 4.46. Probeta HAC-R100A colocada para ensayo a compresión.	223
Figura 4.47. Algunos resultados de los ensayos de rotura a compresión.	223
Figura 4.48. Detalles de rotura de probetas HAC-R100 1A y 2A.	224
Figura 4.49. Detalles de rotura de probetas HAC-R100 1B y 2B.	224
Figura 4.50. Probetas para ensayar a los 28 días, referencias HAC-R100A (4,5,6) y HAC-R100B (4,5,6).	224
Figura 4.51. Resultado de ensayos de referencias HAC-R100A6 y HAC-R100B3.	225

Figura 4.52. Probetas de HAC-R100A y HAC-R100B tras el ensayo de rotura a compresión a los 28 días.	225
Figura 4.53. Acabado y distribución de las partículas de los diferentes áridos empleados.	227
Figura 4.54. Probeta cilíndrica marcada con los tercios de corte y maquina cortadora.	227
Figura 4.55. Tercios cortados de HAC-C; HAC-R100A y HAC-R100B.	229
Figura 4.56. Bomba de vacío y celda LADICIM.	230
Figura 4.57. Calculo del volumen aparente.	231
Figura 4.58. Tercio superior, medio e inferior secos de HAC-C.	231
Figura 4.59. Porosidad de los tercios de probetas cilíndricas	233
Figura 4.60. Absorción de los tercios de probetas cilíndricas.	233
Figura 4.61. Grafica de barras de resistencia a compresión a 7 días.	235
Figura 4.62. Grafica de barras de resistencia a compresión a 28 días.	235
Figura 4.63. Grafica de rotura a compresión a 7 y 28 días.	236
Figura 4.64. Tercio superior, medio e inferior de probeta cilíndrica HAC-C recubiertos con silicona.	237
Figura 4.65. Colocación de junta de caucho y tercio de probeta y colocación del conjunto en aparato de ensayo.	238
Figura 4.66. Cierre hermético con gato hidráulico.	238
Figura 4.67. Aparato de ensayo montado y caudalímetro.	239
Figura 4.68. Montaje de probeta a ensayar.	241
Figura 4.69. Montaje de probetas en bancada de ensayo.	242
Figura 4.70. Grafica de barras de huellas medias de penetración de agua bajo presión.	243
Figura 4.71. Huella de penetración máxima de HAC-C.	243
Figura 4.72. Huella de penetración máxima de HAC-R100A	244
Figura 4.73. Huella de penetración máxima de HAC-R100B.	244

Índice de Tablas

Tabla 1. Emisiones de CO ₂ por actividad industrial.	6
Tabla 2. Comportamiento fritas de masa.	12
Tabla 3. Concentraciones máximas de cada clase de agua.	14
Tabla 4. Unidades de dureza y correspondencia entre ellas.	14
Tabla 5. Comportamiento de diferentes colorantes con diferentes fritas.	18
Tabla 6. Varias formulaciones de esmalte.	19
Tabla 7. Composición química de calidades de acero.	23
Tabla 8. Ensayos de calidad del acero vitrificado.	30
Tabla 9. Comportamiento de materiales frente al fuego.	39
Tabla 10. Comparativa del poder calorífico de residuos usados en fábricas de cemento como combustible.	40
Tabla 11. Formación de compuestos de reacción en función de temperatura.	49
Tabla 12. Composición del Clinker.	50
Tabla 13. Cementos comunes.	58
Tabla 14. Tipos de morteros según escurrimiento.	67
Tabla 15. Dosificaciones de mortero con cemento Portland.	70
Tabla 16. Resistencia de morteros de cemento.	71
Tabla 17. Evolución resistencia a compresión de un hormigón Portland normal.	77
Tabla 18. Consistencia según Abrams.	92
Tabla 19. Consistencia según mesa de sacudidas.	92
Tabla 20. Energía y velocidad de neutrones.	101
Tabla 21. Características de los minerales empleados en protección neutrónica.	105
Tabla 22. Dosificación de un hormigón convencional.	105
Tabla 23. Características físicas.	111
Tabla 24. Elementos detectados en análisis EDX del residuo cerámico en sus tres estados.	119
Tabla 25. Compuestos obtenidos mediante estequiometría de óxidos tras el análisis EDX.	119

Tabla 26. Análisis de Boro del residuo cerámico.	122
Tabla 27. Resultados % de humedad.	124
Tabla 28. Resultados de densidades.	125
Tabla 29. Formulaciones básicas de esmalte.	126
Tabla 30. Relación g (frita) / k esmalte seco y residuo cerámico.	126
Tabla 31. Dosificación de materiales en porcentajes.	130
Tabla 32. Dosificación en peso (g) de los materiales.	131
Tabla 33. Estadillo de ensayos realizados a flexión y compresión.	138
Tabla 34. Primera aproximación dosificación mortero autonivelante sin residuo cerámico.	140
Tabla 35. Primeras dosificaciones de morteros autonivelantes con residuo cerámico polvo.	140
Tabla 36. Dosificaciones definitivas de morteros autonivelantes con residuo cerámico polvo.	141
Tabla 37. Dimensión tortas de escurrimiento de dosificaciones definitivas.	141
Tabla 38. Resultados de % de humedad materiales del HAC.	149
Tabla 40. Tiempos y resultados de superficie específica Blaine.	151
Tabla 41. Cantidades de muestra a tomar en función tamaño de árido.	151
Tabla 42. Resultados granulométricos arena de sílice 0/1mm.	156
Tabla 43. Resultados granulométricos arena caliza 0/4mm.	157
Tabla 44. Resultados granulométricos grava caliza 4/16mm.	158
Tabla 45. Normativas de caracterización de HAC en estado fresco.	162
Tabla 46. Clasificación del HAC según el escurrimiento.	166
Tabla 47. Clasificación del HAC según la viscosidad.	166
Tabla 48. Observaciones de los morteros convencionales con distintos reemplazos de cemento por residuo cerámico.	179
Tabla 49. Resultados de rotura a flexión a 7 días de morteros convencionales.	182
Tabla 50. Resultados de rotura a flexión 28 días de morteros convencionales.	183
Tabla 51. Resultados de rotura a flexión 28 días de morteros convencionales.	183

Tabla 52. Resultados rotura compresión 28 días de morteros convencionales.	184
Tabla 53. Resumen ensayos mecánicos 7 y 28 días morteros convencionales.	185
Tabla 54. Observación de probetas desmoldeadas en morteros autonivelantes.	187
Tabla 55. Ensayos realizados en morteros autonivelantes.	188
Tabla 56. Resultados rotura flexión 7 días morteros autonivelantes.	188
Tabla 57. Resultados rotura compresión 7 días morteros autonivelantes.	189
Tabla 58. Resultados de rotura flexión 28 días de morteros autonivelantes.	190
Tabla 59. Resultados rotura compresión 28 días morteros autonivelantes.	191
Tabla 60. Cuadro resumen ensayos mecánicos morteros autonivelantes.	192
Tabla 61. Combinación de materiales en los HAC a fabricar.	193
Tabla 62. Dosificaciones en peso y en volumen para 1 m ³ de HAC-C y HAC-R100.	194
Tabla 63. Dosificación en peso y en volumen para amasada de 30 l de HAC-C de prueba.	194
Tabla 64. Resultados de caracterización de amasada de prueba de 30 l HAC-C.	198
Tabla 65. Resultados de ensayos de compresión de la amasada de prueba del HAC-C.	202
Tabla 66. Calculo de materiales en peso y volumen amasada de 85 l de HAC-C.	202
Tabla 67. Resultados de ensayos del HAC-C en estado fresco.	208
Tabla 68. Nueva dosificación del HAC-C con la adición de agua.	209
Tabla 69. Resultados de compresión del HAC-C a los 7 y 28 días.	211
Tabla 70. Finura FC, RCP y ASI.	213
Tabla 71. Dosificación del HAC-R100.	214
Tabla 72. Nueva dosificación del HAC-R100A	217
Tabla 73. Resultados de ensayos en estado fresco del HAC-R100A.	217
Tabla 74. Nueva dosificación HAC-R100B.	219
Tabla 75. Variaciones en peso agua /cemento.	220
Tabla 76. Resultado de ensayos de caracterización en fresco del HAC-R100B.	222
Tabla 77. Resultados de ensayos de compresión HAC-C; HAC-R100A y HAC-R100B.	222

Tabla 78. Tabla del total de probetas fabricadas.	226
Tabla 79. Características físicas de los HAC-C; HAC-R100A y HAC-R100B.	232
Tabla 80. Ensayos de resistencia a compresión.	234
Tabla 81. Ensayos de permeabilidad al oxígeno.	240
Tabla 82. Ensayos de penetración de agua bajo presión.	242.