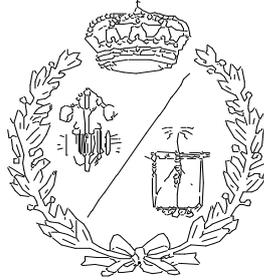


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE ESMALTE  
VÍTREO EN MORTEROS Y MORTEROS  
AUTONIVELANTES**

**REUSE OF GLASS ENAMEL WASTE IN  
MORTARS AND SELF-LEVELING MORTARS**

Para acceder al Título de  
**GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

Autor: Eduardo Liaño Campo

Director: Carlos Thomas García

Julio-2021



## **AGRADECIMIENTOS**

Antes que nada, quiero agradecer a mi tutor Carlos Thomas García la ayuda que me brindó para la realización de esta investigación. Gracias también al personal Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de Materiales (LADICIM) por poner las máquinas, los instrumentos y materiales necesarios a mi disposición para realizar la investigación.

Un verdadero agradecimiento a Eugenio Gómez Gómez, persona gracias a la cual se ha podido realizar este proyecto y a la cual le agradezco mucho su ayuda a lo largo del recorrido que ha conllevado esta investigación.

Dar las gracias a la empresa Vitrinor-Vitrispan por poner a mi disposición el esmalte vítreo, es decir, el residuo.

Por último, agradecer a mi familia y amigos todo el apoyo recibido durante este trabajo y el resto de los años en mi grado ingeniería mecánica.

# ÍNDICE

## RESUMEN

1	INTRODUCCIÓN .....	8
1.1	DESARROLLO SOSTENIBLE .....	8
1.1.1	DESARROLLO SOSTENIBLE EN ESPAÑA .....	9
1.2	IMPACTO AMBIENTAL, CEMENTO PORTLAND.....	9
1.2.1	USO DE LA ENERGÍA.....	10
1.2.2	EMISIONES A LA ATMÓSFERA .....	10
1.3	EL RESIDUO, ESMALTE VITRIFICADO.....	11
2	OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.....	13
3	ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	17
3.1	ESMALTES VÍTREOS .....	17
3.1.1	CONCEPTO DEL ESMALTE VITRIFICADO .....	17
3.1.2	COMPOSICIÓN DEL ESMALTE VITRIO .....	17
3.1.3	PROCESO DE MOLIENDA.....	21
3.1.4	DESCARGA Y CONTROLES A EFECTUAR SOBRE LA BARBOTINA MOLIDA 22	
3.1.5	PROCESOS DE ESMALTADO .....	22
3.2	GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS DE ESMALTE VIDRIO PARA ESTA INVESTIGACIÓN.....	25
3.3	CEMENTOS Y ADITIVOS.....	27
3.3.1	HORMIGONES .....	27
3.3.2	AGUA Y ÁRIDOS.....	28
3.3.3	DEFINICIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.....	28
3.3.4	FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.....	29
3.3.5	PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND .....	30
3.4	PROBLEMAS QUE PROVOCA LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND .	34
3.5	ADICIONES Y TIPOS DE CEMENTOS PORTLAND .....	35

3.6	MORTEROS Y MORTEROS AUTONIVELANTES.....	37
3.6.1	EL MORTERO .....	37
3.6.2	MORTERO AUTONIVELANTE .....	38
4	MATERIALES Y ENSAYOS DE MORTEROS.....	40
4.1	MATERIALES .....	40
4.2	PROCESO DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL ESMALTE VITRIFICADO.....	43
4.3	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS MORTEROS .....	49
4.3.1	FASE 1: MORTEROS CONVENCIONALES .....	49
4.3.2	FASE 2: MORTEROS CONVENCIONALES MODIFICADOS .....	50
4.3.3	FASE 3: MORTEROS AUTONIVELANTES .....	51
4.4	FABRICACIÓN DE LOS MORTEROS .....	54
4.5	ENSAYOS SOBRE MORTEROS .....	62
5	NÁLISIS GENERAL Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS .....	66
5.1	FASE 1: MORTEROS CONVENCIONALES .....	66
5.1.1	RESISTENCIA A FLEXIÓN.....	66
5.1.2	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	68
5.2	FASE 2: MORTEROS CONVENCIONALES MODIFICADOS .....	70
5.2.1	RESISTENCIA A FLEXIÓN.....	70
5.2.2	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	72
5.3	FASE 3: MORTEROS AUTONIVELANTES .....	74
5.3.1	ENSAYOS DE ESCURRIMIENTO .....	74
5.3.2	RESISTENCIA A FLEXIÓN.....	75
5.3.3	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	77
6	CONCLUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	81
7	BIBLIOGRAFÍA .....	84

## RESUMEN

Esta investigación busca lograr una disminución del uso del cemento Portland con ayuda del residuo de esmalte vítreo. Se realizan 3 fases distintas, en cada una de ellas se realiza una serie de probetas con materiales distintos, en la primera fase se realizan probetas con las siguientes relaciones de cemento-residuo 0%, 25%, 50% y 75% de residuo en la probeta, una segunda fase en la que se realizan probetas con una relación de cemento-residuo de 5%, 10%, 15% y 20% del residuo tratando de encontrar el material con las mejores propiedades, y por último, la tercera fase en la cual se crean varias probetas de mortero autonivelante en las cuales va variando el porcentaje de filler calizo y/o filler residuo. En todas las fases se realizan ensayos de resistencia a flexión y compresión, y en la tercera fase, además, un ensayo de escurrimiento. Con todo ello se logra un mortero en el que, si se sustituye un pequeño porcentaje de cemento por residuo, se obtiene un material con unas cualidades aceptables, y sobre el mortero autonivelante se logra unas propiedades mecánicas mejores que las obtenidas sin el uso del residuo, logrando de esta manera el objetivo de esta investigación.

This research seeks to achieve a reduction in the use of Portland cement with the help of vitreous enamel waste. Three different phases are carried out, in each of them a series of specimens with different materials is made, in the first phase specimens are made with the following cement-waste ratios: 0%, 25%, 50% and 75% of waste in the specimen. A second phase in which specimens are made with a cement-waste ratio of 5%, 10%, 15% and 20% of the residue, trying to find the material with the best properties, and finally, the third phase in which several specimens of self-leveling mortar are produced, in which the percentage of limestone filler and/or waste filler varies. Flexural and compressive strength tests are carried out in all phases, and in the third phase, also a consistency test. With all this, a self-leveling mortar with better mechanical properties than those obtained without the use of the waste is achieved, thus achieving the objective of this research.

# 1 INTRODUCCIÓN

# 1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta investigación es la búsqueda de un nuevo hormigón, aprovechando residuos y en base a estos residuos la posibilidad de obtener un hormigón especial para la protección radiológica. El hormigón es el material fabricado por el hombre más utilizado de la historia, solo el agua lo supera como el recurso más consumido en el planeta, ha dado forma a gran parte de las construcciones que nos rodean, pero también deja una enorme huella de carbono.

En este trabajo se investiga la posibilidad de reducir su impacto medio ambiental, para ello, este hormigón estará formado con distintos porcentajes de cemento Portland y residuos de esmalte vítreos. De esta manera no solo se conseguirá reducir el impacto medioambiental del cemento, sino que también se le da un uso al residuo de este tipo de esmalte.

## 1.1 DESARROLLO SOSTENIBLE

Este término consiste en el desarrollo socioeconómico y fue normalizado por primera vez en el Informe Brundtland en el 1987, gracias al trabajo conjunto de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas. Dicha definición se asumió en el Principio 3º de la Declaración de Río (1992): Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades.

El desarrollo sostenible lo podemos dividir en tres partes, ambiental, económica y social. El resultado es un conjunto de indicadores de desempeño de una organización en las tres partes. Estas tres componentes tienen que ser comprendidas, según varios textos de las Naciones Unidas, incluyendo el Documento Final de la Cumbre Mundial de 2005, como "pilares interdependientes que se refuerzan mutuamente" (1).

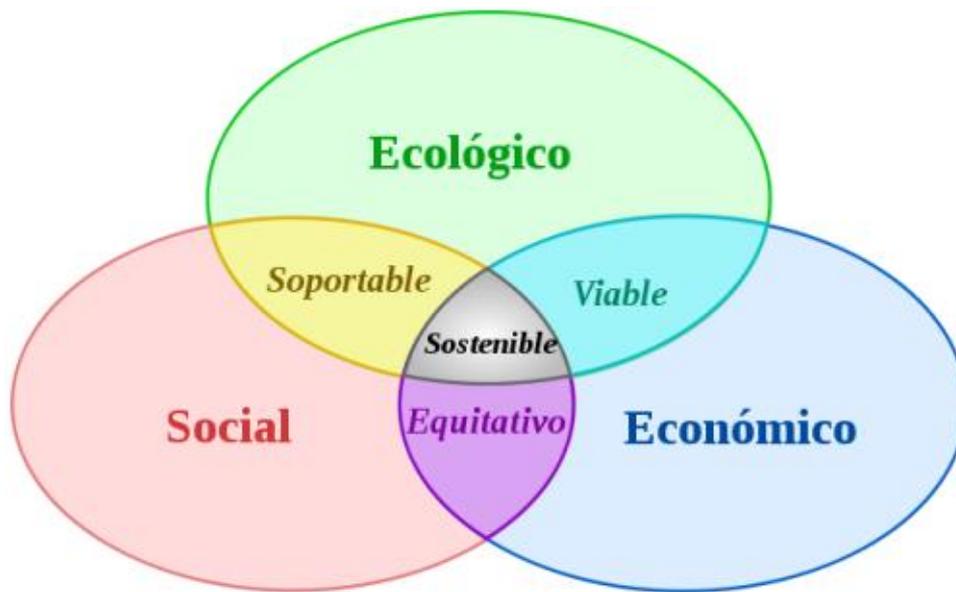


Figura 1. Pilares del desarrollo sostenible. Fuente: SSM Comunicación y Periodismo.

### 1.1.1 DESARROLLO SOSTENIBLE EN ESPAÑA

España cuenta con una Estrategia Española de Desarrollo Sostenible y una Ley 45/2007, de 13 de diciembre, de Desarrollo Sostenible del Medio Rural. Esta estrategia ha sido elaborada por el Grupo Interministerial para la Revisión de la Estrategia de Desarrollo Sostenible de la Unión Europea y la preparación de la Estrategia Española de Desarrollo Sostenible, bajo la coordinación de la Oficina Económica del presidente del Gobierno español. El Grupo, que cuenta con representantes de la mayor parte de los Ministerios, está presidido por la Secretaría de Estado de Economía y la Subsecretaría del antiguo Ministerio de Medio Ambiente se constituye como la secretaría del mismo (2).

## 1.2 IMPACTO AMBIENTAL, CEMENTO PORTLAND

Hoy en el hormigón es el material más empleado el mundo, tras el agua, cada año la industria del hormigón utiliza 1,6 millones de toneladas de cemento, 10 billones de roca y arena, y un billón de toneladas de agua. Esto implica que por cada tonelada de cemento se necesario 6.25 toneladas de roca caliza (1). Además, esta acarrea una elevadísima liberación de CO<sub>2</sub> durante su fabricación a causa de la energía necesaria y que para la obtención de la materia prima y áridos para la obtención del cemento se destruyan ciertos hábitats y pudiendo dar lugar a una contaminación del aire y del agua de la zona.

El Clínger, material explicado anteriormente, necesita de un consumo muy elevado de energía debido a las altas temperaturas que alcanzan los hornos.

El cemento Portland es el componente del hormigón que mayor impacto ambiental tiene. Para su fabricación se usan los siguientes procesos, por vía húmeda, es el más antiguo y el que más energía consume por ello las empresas intentan progresivamente deshacerse de él, y por vía seca, pudiendo ser secado prolongado, seco con precalentamiento y seco con precalcinado. Además de la energía consumida, el impacto que provoca la extracción de las materias primas ya que explicado anteriormente.

### **1.2.1 USO DE LA ENERGÍA**

Esta fabricación hace un uso masivo de la energía, como ya se ha comentado anteriormente. Las materias primas se tienen que “piroprocesar” en grandes hornos a temperaturas muy elevadas superiores a 1.500 °C para la obtención del Clíinker.

Se considera que en 2006 la producción de una tonelada de cemento en un año de producción requiere 3.191,95 MJ de energía (3).

### **1.2.2 EMISIONES A LA ATMÓSFERA**

El sector del cemento es responsable de alrededor de un 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, principal gas del efecto invernadero y del cambio climático. Esta emisión es producida por dos vías principales la conversión química de la piedra caliza producida durante la calcinación y el propio consumo de carbón para como combustible. Hoy en día estas emisiones están reduciendo de forma drástica de las siguientes maneras:

- Uso del proceso seco, mucho más eficiente que el proceso por vía húmeda.
- Aumento el uso de cementos mixtos.
- La sustitución de combustibles fósiles por energías renovables.

La extracción de la materia prima conlleva que en el proceso se liberen ciertas partículas pudiendo producir cierto impacto ambiental, las cuales pueden causar problemas respiratorios ya que el cuerpo no es capaz de eliminarlos.

Durante la quema de combustibles fósiles, se libera óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) cuanto mayor sea la temperatura de combustión mayor cantidad se libera. Esto provoca el empeoramiento de la calidad del aire y puede llegar a ser perjudicial para el ser humano.

Por otro lado, durante este proceso también se expulsan partículas de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), estos son producidos por los propios compuestos sulfurados presentes en las materias primas y durante la quema de combustible.

Por último, a la atmosfera también se emiten una serie de productos nocivos de la contaminación del aire producidos por la propia industria del cemento al emplear y producir ciertos materiales con características químicas que pueden ser nocivas para la salud, componentes como el monóxido de carbono (CO) y VOCs (hidruros de carbono en estado gaseoso), pueden ser liberados, además, algunas partículas metálicas a la hora de fabricar el Clínter en los hornos.

### **1.3 EL RESIDUO, ESMALTE VITRIFICADO**

El esmalte vitrificado es un compuesto vítreo solidificado con una composición inorgánica, su principal componente es la sílice. Se le pueden añadir distintos óxidos metálicos para obtener distintos colores. A la hora del recubrimiento de superficies metálicas es un método de protección muy utilizado ya que asegura una alta protección en cuanto a la dureza, resistencia al calor, a la abrasión y químicos. Es importante tener en cuenta sus limitaciones impuestas por la forma de la pieza. Presentan distintos grados de transparencia, obteniendo tres tipos principales de calidades: transparentes, ópalo y opacos (4).

El esmaltado industrial con el que se trabaja recubre materiales como el acero en forma de chapa, cuya aplicación se realiza a temperaturas de 850°C.

Su aplicación permite que las superficies metálicas ofrezcan una excelente protección contra la corrosión, además de conseguir resistir a casi todos los ataques de materiales orgánicos y a la mayoría de los inorgánicos. Además, esto le garantiza a la superficie con recubrimiento de esmalte vítreo una serie de ventajas como: una superficie suave debido a la falta de poros, dureza, higiene (no olores o sabores), poseen una fácil limpieza, no son tóxicos, inhiben el crecimiento de bacterias, son altamente durables, estabilidad de color, resistencia a la intemperie, entre muchas más propiedades (5).

Esto permite que este recubrimiento sea muy utilizado y se vean en objetos tan cotidianos como: utensilios para hornear y freír, lavadoras y secadoras, equipos industriales y de construcción, son algunos de los ejemplos más comunes en los que se puede ver este recubrimiento.

Los métodos más utilizados de aplicación son mediante inmersión o proyección. La pieza esmaltada posee la apariencia de tener adherido un polvo fino a la superficie. Tras esto, la pieza esmaltada es introducida a unos hornos a alta temperatura.

Es por todo esto por lo que se fundamenta esta investigación ya que se busca reducir el impacto medioambiental provocado por el cemento y lo que conlleva además de lograr darle una reutilización al residuo de esmalte vítreo.

## 2 OBJETIVOS

## 2 OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

El objetivo principal de este proyecto de investigación es estudiar la viabilidad de empleo de residuos de esmaltes vítreos como sustitutivos totales o parciales de cemento Portland, tanto en morteros como en hormigones.

Una vez que la industria genera un residuo; nos tenemos que preguntar en primer lugar ¿cómo puede ser aprovechado este residuo? La respuesta sería la reutilización de los residuos como materia prima, su valorización, o lo que es lo mismo, que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, es el paso del residuo a recurso.

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.

Con esta reutilización de residuos como materia prima no sólo se trata de reducir y abaratar costes, sino también obtener 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 en un simple abandono de los residuos, y en ambos casos, su destino final es un vertedero, lo que implica la consiguiente degradación medioambiental.

Para hacer frente al desafío de agregar valor a los 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 de construcción (morteros y hormigones) en sustitución del cemento Portland.

Esta línea de investigación de nuevos materiales cementantes, usando residuos 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. El proceso productivo del cemento lleva asociado altas emisiones de CO<sub>2</sub>.

El hormigón es el bien artificial más consumido en el mundo. No existe ningún otro material tan durable y versátil, ni se vislumbra ningún material sustitutivo en el medio plazo, la industria cementera española se ha fijado como objetivo para 2030 reducir en un 43% las emisiones a lo largo de toda su cadena de valor.

## La fabricación de clínker supone la mayor parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la producción de cemento

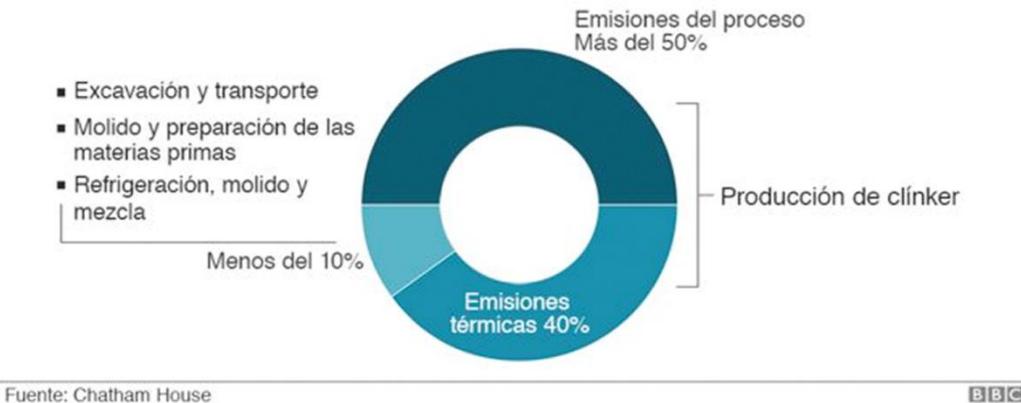


Figura 2. Gráfico de las emisiones de la producción del clínker según la BBC.

Teniendo en cuenta que la industria cementera; de la cual sacamos el Clínker, y del cual, mediante adiciones de yeso ( $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ), se obtiene el cemento Portland; es una industria altamente contaminante debido a la explotación de recursos naturales (canteras), emisiones a la atmósfera de grandes cantidades de gases contaminantes causantes del efecto invernadero y por consiguiente del calentamiento global del planeta ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ). Las emisiones de  $\text{CO}_2$ , son debidas principalmente a la descarbonatación de la caliza ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) obteniendo  $\text{CO}_2$  y óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ); siendo este óxido de calcio una de las materias primas del clínker.

A nivel mundial, se maneja el dato que el 6-7% de las emisiones de  $\text{CO}_2$  son debidas al sector cementero.

La producción de cemento en el año 2005, a nivel global, emitió a la atmosfera 932 Mt  $\text{CO}_2$ /año, lo que representa un 6,9% del total y en nuestro país en 2018, las industrias cementeras emitieron más de 15 Mt de  $\text{CO}_2$ . 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.

El residuo de esmalte vítreo con el que vamos a trabajar básicamente está compuesto de altas cantidades de  $\text{SiO}_2 > 30\%$  y diversos óxidos metálicos de Na, K, Mg, Al, Fe, Ti; conteniendo también importantes cantidades de Boro, superiores al 15%.

Como se comentaba al comienzo de este apartado de objetivos, el principal de este proyecto de investigación, es ensayar la viabilidad de empleo de estos residuos de esmaltes vítreos como sustitutivos totales o parciales de cemento Portland, tanto en morteros como en hormigones, hay que tener en cuenta además que si la viabilidad de este estudio es posible

habría la posibilidad de utilización en hormigones de protección radiológica, debido a la capacidad que tiene el Boro en la absorción de neutrones.

También decir que esta investigación de 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.

Para alcanzar los objetivos propuestos, la investigación se realizará en varias etapas, las cuales son las siguientes:

Etapa 1.- Caracterización de los residuos. El objetivo de esta etapa es caracterizar los residuos de esmalte vítreo en sus tres formas de estado (polvos, fangos y tortas de filtrado) para ver su composición química (Fluorescencia de Rayos X) y estado de humedad. De esta forma podremos ver su composición tanto cualitativa como cuantitativa y su homogeneidad.

Etapa 2.- Ensayos del poder de reacción del residuo con el cemento Portland en la fabricación de morteros y morteros autonivelantes. Se verá su fraguado y endurecimiento y se realizarán ensayos de fluidez y de resistencia mecánica a flexión y compresión con las probetas fabricadas a los 7 y 28 días, comprobando el resultado de los ensayos en probetas con varias proporciones de cemento/residuo.

Etapa 3.- Determinación de las mezclas óptimas cemento/residuo en el mortero desde el punto de vista mecano-resistente.

# 3 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

## 3 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 3.1 ESMALTES VÍTREOS

Dentro de la tecnología del esmalte vítreo se estudiará en detalle su aplicación sobre aceros, también llamado acero vitrificado.

#### 3.1.1 CONCEPTO DEL ESMALTE VITRIFICADO

Para comenzar se tiene que remarcar la diferencia entre un esmalte vidrio y otros recubrimientos, más concretamente los “poliesmaltes o lacas”. Estos últimos se tratan de unos recubrimientos de naturaleza orgánica, los cuales polimerizados a temperaturas inferiores a 450°C y con una superficie que no es vítrea. Por otro lado, los recubrimientos con esmaltes vítreos tienen una temperatura de sinterizado por encima de los 800°C y son totalmente inorgánicos.

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”.

#### 3.1.2 COMPOSICIÓN DEL ESMALTE VITRIO

El conjunto de componentes del esmalte es aquellos que forman la denominada fórmula de molienda, los cuales se introducen en un molino de bolas y se muelen por un tiempo determinado, dependiendo del tipo de suspensión de esmalte a obtener; esta suspensión es la barbotina. Hay tres componentes del esmalte: frita + agua + agente de suspensión; se analizan a continuación.

- Frita: material cerámico y fusible, es el componente principal de todos los esmaltes vítreos. Material que se obtiene como resultado de un proceso de fundido de una mezcla de materias primas a temperaturas comprendidas entre 1350°C-1500°C. dichas materias inorgánicas tales como, bórax, sílice, sosa, feldespato, criolita, junto con diversos óxidos metálicos (8).

Según la Asociación Nacional de Fabricantes de Fritas, Esmaltes y Colores Cerámicos, “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”.



*Figura 3. Escamas de fritas*

El proceso de fabricación de la frita depende del tipo que se vaya a fabricar y está formado por el pesado, la dosificación y mezclado de las materias primas, tras esto las materias primas son introducidas en un horno de fusión. El material resultante sale del horno en una lámina continua que es refrigerada por agua pasando por unos rodillos y de esta forma cambiando bruscamente su temperatura convirtiéndolo en un material sólido y fragmentado.

Los tipos de fritas se pueden diferenciar en, de masa y de cubiertas, estas segundas a su vez se dividen en opacas, semitransparentes y transparentes.

La frita de masa forma parte de los esmaltes de fondo, por ello también es conocida como frita de fondo o de fundente, su función consta de lograr la adherencia con la chapa de acero. Este proceso se lleva a cabo durante el sinterizado del esmalte y está formado por 3 fases, una primera fase la de formación de FeO por oxidación del hierro, se continúa con la disolución del FeO formado en el esmalte y acabando con la reacción de los óxidos de Co y Ni cuando todo el FeO está disuelto.

Por otro lado, las fritas de cubierta llamadas así debido a que forman parte de los esmaltes que se aplican encima del esmalte de fondo y con lo cual obteniendo el color de dicho recubrimiento. La relación de esta frita con el color viene marcada por el tipo con el que se trabaje, es decir, para obtener colores blancos o pastel se trabajará con las fritas opacas, para la obtención de colores moderados se utiliza con semiopacas, y para la obtención de colores fuertes serán las fritas transparentes.

- *Agua*, se trata de 1 de los componentes básicos del esmalte para su aplicación en húmedo sobre chapa de acero, con el paso del tiempo se le ha ido dando más importancia al agua que se utilizaba llegando a una recomendación máxima de 105 mg de agua por cada litro de esmalte (8,9).

Todo esto comenzó a partir de la década de 1970, cuando se comenzó a tomar conciencia de la importancia de la pureza del agua, la pureza se realizó en base a parámetros químicos obteniendo 3 tipos de calidades los cuales están reflejados en la siguiente tabla, Tabla 1.

Tabla 1. Concentraciones máximas de agua de cada clase de agua en mg/l

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

Analizando el agua a utilizar se obtendrá que, para las concentraciones iguales o menores a los valores de A, el esmaltado se realizará de forma correcta. con cantidades intermedias entre A y B se realizará el esmaltado de forma aceptable. Si los análisis están entre B y C posiblemente de problemas y a consecuencia de ello es muy probable que haya que realizar una desmineralización. Por último, si la concentración es superior C, habrá que realizar una desmineralización.

- *Agentes de suspensión*, estas sustancias se añaden al agua ya la frita en la formulación del esmalte en el momento de carga y molturación de molinos de bolas y/o al esmalte una vez molido antes de salir a producción para su acondicionamiento. estos componentes son los siguientes.

*Arcilla*. Químicamente son silicatos hidratados de alúmina, se utilizan a causa de sus propiedades de suspensión y para dar fortaleza al esmalte seco, normalmente se usan proporciones entre el 3-10% con relación siempre a la frita.

*Bentonita*. Se trata de una arcilla coloidal, muy fina y mucho más efectiva que la arcilla a la hora de proporcionar suspensión, pero trabaja negativamente a lo referido en el brillo de la superficie vitrificada. se emplea en cantidades alrededor de 0,25-1%.

*Cuarzo*. Material refractario, se trata de una sustancia que interviene en mayor cantidad entre todos los componentes de un esmalte. Utilizado para esmaltes de base ya que

proporciona un aumento del rango de cocción, lo cual le permite evitar quemados durante la cocción, facilitar el desgasificado de la chapa y rebajar el costo de la fórmula del esmalte debido a su bajo precio. Para dicho esmalte la cantidad utilizada es de 10-20% con relación a la frita.

*Bórax.* Se presenta en cristales incoloros que con el aire pierden el agua y se vuelven blancos. El ácido bórico que aporta tiene la propiedad de disolver los óxidos metálicos, gracias a ello es esencial en los esmaltes de fondo para disolver las impurezas en las chapas de acero.

*Nitrito sódico.* Polvo blanco y amarillento, se emplea para los esmaltes de base con una cantidad que ronda el 0,1% sobre la frita.

*Pirofosfato sódico.* Polvo granular blanco, utilizado para rebajar la consistencia de la barbotina ya molida.

*Carbonato potásico.* Empleado para el acondicionamiento de la barbotina una vez molida y para mejorar la consistencia de los esmaltes de cubierta. Especialmente utilizado en colores blancos y azules.

*Carbonato de litio.* Disminuye el rango de cocción del esmalte, especialmente usado en aquellos esmaltes con un bajo punto de fusión.

*Aluminato sódico.* Empleado para la preparación de la barbotina molida para aumentar la consistencia de los esmaltes de cubierta, principalmente en los blancos.

*Urea.* Se emplea añadiéndolas barbotinas molidas en el momento de salir de la producción, consiguiendo aumentar la dureza del esmalte seco consiguiendo así evitar las roturas durante la manipulación de las piezas esmaltadas.

*Opacificantes.* Se puede aplicar en las fritas fundidas o en las formulaciones, generalmente para blancos y pasteles.

*Pigmentos o colorantes.* Generalmente oxidados y sales de cationes metálicos, cuya función es la de producir diferentes colores en las fritas durante el proceso de vitrificado dentro de un intervalo de temperaturas de 800-850°C. Estos colorantes deben reunir una serie de condiciones que aseguren un buen resultado en la superficie vitrificada, deben ser estables, resistir bien las temperaturas de cocción y distribirse bien en la masa de esmalte.

### 3.1.3 PROCESO DE MOLIENDA

Proceso en el cual todos los componentes de una fórmula 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. Estos molinos son cilíndricos, tienen diferentes tamaños, están revestidos por dentro y están equipados con bolas para poder hacer la molturación de los componentes del esmalte, especialmente de las fritas.

En cuanto al esmalte vitrificado el recubrimiento más utilizado y recomendable es el de esteatita o de porcelana, ya que por ejemplo el de goma no se puede utilizar para estos esmaltes, y el sílex, puede llegar a contaminar el esmalte molido y sus acabados son irregulares.

Las bolas con las cuales se realizan la molturación suelen ser de pedernal, porcelana o esteatita, siendo estas dos últimas las más utilizadas. es importante que cumplan los siguientes requisitos: dureza y resistencia a la abrasión, material denso, su forma esférica, lisas y ser homogéneas. Generalmente se usan 3 tamaños diferentes en función de la etapa en la que se encuentran se usa de un tamaño u otro, siendo las más grandes para la etapa inicial y finalizándolo con las más pequeñas. generalmente los tamaños de estas bolas rondan los 60, 50, 40 y 30 mm.

Se ha verificado que cuando el 55% del volumen del molino está ocupado por las bolas y la distribución es la siguiente: 20-25% de las bolas grandes + 20-25% de las pequeñas + 60-50%, se obtiene la mayor capacidad de molienda de las bolas. Al calcular el número de bolas, también debe tenerse en cuenta que el volumen real de la bola es el 63% del 55% del volumen teórico de la bola (9).

Otro parámetro del proceso de molienda es la velocidad del molino. Durante la rotación del molino, el revestimiento interior tira de la carga hacia arriba debido a la fricción. A altas velocidades, debido a la fuerza centrífuga, la carga siempre permanecerá en la misma posición sin moler. Si la velocidad es baja, la carga no se llevará hacia arriba, porque el peso propio es mayor que la fricción, lo que hace que el revestimiento se deslice debajo de la carga y el efecto de molienda es pequeño. Estas dos situaciones no son adecuadas para operaciones de rectificado correctas. La velocidad debe hacer que la carga se eleve a la altura correcta, desde donde caerá en cascada hasta la carga que está debajo. La velocidad depende de las dimensiones internas del molino y del tipo de bola utilizada, y oscila entre 17 y 34 rpm.

El tiempo de trituración depende básicamente de la finura requerida de la suspensión de la barbotina a obtener. Cuanto más fina es la molienda, mayor es el tiempo de molienda y el tiempo de molienda de las bolas de esteatita es más corto que el de las bolas de porcelana, debido a la densidad del material.

Por lo general, se instala un dispositivo de medición del tiempo o un contador de vueltas en el laminador para que se detenga automáticamente cuando el laminador alcance el tiempo o número de revoluciones programado. Después de detener el molino, se verifica la finura, si aún es incorrecta, se determina el ajuste mediante un tiempo de molienda un poco más largo.

### **3.1.4 DESCARGA Y CONTROLES A EFECTUAR SOBRE LA BARBOTINA MOLIDA**

Una vez que el esmalte se considera molido, debe pasar por una serie de controles antes de su descarga, que son básicamente: finura, densidad, peso de la mancha y tablero de control de color. El control de color se realiza visualmente en comparación con la placa estándar. Cuando el control de color debe ser preciso con los patrones fijados, se utiliza el método del colorímetro para la medición, que se basa en los tres colores primarios: rojo, verde y azul (RGB).

Durante el proceso de descarga, la lechada pasa a través de unos tamices vibratorios para eliminar las partículas de frita de vidrio sin triturar, o pequeños trozos de bolas rotas. Utiliza malla de 40 a 50 hilos/pulgada. El esmalte descargado se bombea a un tanque de almacenamiento, se agita con un agitador y se enfría a aproximadamente 40 °C cuando el esmalte sale del molino.

### **3.1.5 PROCESOS DE ESMALTADO**

Para llevar a cabo el correcto esmaltado sobre chapa de acero habrá que realizar las siguientes fases del proceso, las cuales esquemáticamente se representan en la Figura 4.



*Figura 4. Fases del proceso de esmaltado*

- *Elección de placa de acero.* Para obtener un buen efecto en el esmalte de acero, es extremadamente importante que la placa de acero tenga una determinada calidad superficial y composición química. Entre estas características se pueden mencionar las siguientes: Calidad de embutición suficiente, menor porcentaje de contenido de C y la correcta elección del espesor de chapa para dar a las piezas la rigidez necesaria, por encontrarse a temperaturas superiores a 800°C. Por lo general, el grosor es de 0,8 mm a 2 mm.

La principal diferencia entre estas cualidades es el porcentaje de carbono y la resistencia a la deformación del acero con la temperatura de trabajo, y la calidad de descarburación es mayor.

- *Tratamiento superficial de acero.* Debido al proceso de laminado y corte en la acería y al proceso de embutido en el propio taller de esmalte, las placas de acero se recubren con grasa. El propósito del tratamiento de la superficie es usar desengrasante para eliminar la grasa y otros depósitos, remojándolo o rociándolo. En la actualidad, el método más utilizado es la aspersión, ya que produce dobles tratamientos sobre la placa de acero: tratamiento químico de los productos desengrasantes y tratamiento mecánico por el impacto de los reactivos sobre la placa de acero provocado por la aspersión.

- *Obtención de la barbotina.* Se ha comentado en los capítulos 2.1.5 y 2.1.6.

- *Sistemas de aplicación del esmalte.* En esta sección se describen las diferentes técnicas utilizadas para cubrir el objeto a esmaltar en función de su aplicación. En cuanto a la aplicación en seco se aplica el esmalte en polvo y posteriormente un sistema electrostático, por otro lado, si su aplicación es en húmedo, se realizará un sistema de inmersión para posteriormente realizar una proyección neumática.

El sistema de pulverización en seco también se denomina pulverización de polvo, para su pulverización se utiliza un sistema electrostático, que implica generar una diferencia de potencial entre la punta de la pistola pulverizadora y la lámina a recubrir. Una vez que esta diferencia de potencial se detiene, el esmalte ya no se depositará ni se caerá. Este sistema es muy adecuado para piezas planas de gran tamaño con una sola capa de esmalte, su ventaja es que el número de capas de esmalte se puede ajustar mucho y no es necesario secar. Por el contrario, el equipo utilizado es muy caro, y el color de este esmalte tiene grandes limitaciones.

El sistema de aplicación más utilizado es la vía húmeda, que tiene dos variantes: inmersión y proyección. El proceso de inmersión consiste en sumergir las piezas a esmaltar en el bloque de esmalte. Una vez insertadas estas piezas, se pueden drenar de forma natural, separando el exceso de esmalte y volviéndolo a utilizar. En la actualidad, para realizar esta operación, existen máquinas automáticas de alta capacidad que producen utensilios de cocina, solo un operario almacena y saca las piezas y la máquina limpia automáticamente las piezas. Este sistema de impregnación puede lograr un alto rendimiento y un uso general de la barbotina, pero a pesar de esto, la distribución del esmalte en la superficie no es uniforme.

Es muy importante en este sistema de aplicación es la reología del esmalte, que debe controlarse y ajustarse con bastante regularidad, ya que la consistencia disminuye con el frío y aumenta con el sobrecalentamiento, la temperatura ideal es de 19-24 °C. El sistema es muy adecuado para piezas revestidas con esmalte básico por ambas caras. El espesor de deposición de la capa de esmalte es de 90-120 micrones. Todas las piezas, una vez esmaltadas, se colocan en una cinta transportadora continua para su secado.

El sistema de pulverización se usa primero para el esmalte de techo o aquellas partes que tienen dificultades en el sistema de drenaje. Este sistema; tiene sus ventajas y desventajas, entre las que podemos mencionar: superficie de esmalte regular, un espesor uniforme y la posibilidad de automatización del robot, la desventaja más importante es la pérdida irre recuperable de esmalte.

El dispositivo de proyección del esmalte está formado en primer lugar por un compresor que proporciona el aire comprimido necesario a una presión de 3 atmósferas. La pulverización se realiza mediante una pistola pulverizadora especial, que se compone principalmente de 2 boquillas, una dentro de la otra. La presión del aire arrastra el bloque de esmalte para proyectarlo sobre la pieza a esmaltar.

La cabina de aplicación debe ser de acero inoxidable y evitar el uso de otros materiales, como el hierro, porque la humedad producirá óxido de hierro, que contaminará el esmalte. Por lo general, la cabina de pintura está equipada con un panel eléctrico con un temporizador de pintura, un soporte giratorio para colocar las piezas para el suministro y un panel neumático al que se conecta la manguera de aire mediante un sistema de conexión rápida. Asimismo, la cabina de pintura contará con un área de succión para absorber el polvo generado durante la aplicación, y esta área estará conectada a un filtro de mangas para evitar que las partículas de esmalte ingresen a la atmósfera. La sala de pulverización también tiene un área para drenar el exceso de esmalte para su posterior reciclaje, y se instala agua para limpiar la pistola cuando cambia de color.

Finalmente, lo que atañe a este sistema es el lograr una menor pérdida de material durante su aplicación y de esta manera originando menos residuo, residuo que es objeto de esta investigación para su uso mediante reciclado.

De forma general del 100% de esmalte que se aplica sobre la pieza, el 40% se adhiere a ella correctamente y el 60% restante queda sin aplicación, de ello un 52% se recupera y será introducido a la mezcla con esmalte virgen, un 7% se pierde debido a la aspiración y es recogido por filtros, y, por último, un 1% se pierde en el lavado de las instalaciones y el material usado, el cual se almacenará en aguas residuales para posteriormente filtrarlas.

-*Secado del esmalte.* Una vez que se aplica el esmalte, la pieza de esmalte se carga en la cinta transportadora para secarla mediante cualquiera de los dos métodos descritos anteriormente. La secadora es una instalación cerrada con entrada y salida de agua, y la parte húmeda se hace circular y se seca en el interior. Dentro de la secadora, el transportador está diseñado con un sistema giratorio de cadena para mantener la pieza de trabajo en contacto con el aire caliente por más tiempo, la temperatura interna de la secadora es de 110°C y el sistema de secado de piezas adopta un método de convección. Por lo general, el aire caliente proviene del

gas de combustión del horno de vitrificación y el propósito del secado es eliminar la humedad de la suspensión de esmalte. Después de que la hoja de esmalte se seca, un polvo muy fino se adhiere a su superficie. En este momento, el esmalte seco se llama bizcocho y se puede manipular.

*-Vitrificado del esmalte.* Una vez que la capa de esmalte está seca, el objeto con esmalte se puede transferir a la cadena del horno de vitrificación.

El interior del horno está revestido con ladrillos refractarios de diferentes calidades, según la temperatura que soporten, y recientemente también revestido con paneles de lana de vidrio. Esta nueva tecnología para el revestimiento de hornos es una gran mejora, porque los hornos refractarios industriales tardan 3 días en alcanzar una temperatura de trabajo superior a 800°C, mientras que la lana de vidrio puede alcanzar la temperatura de trabajo en 4-5 horas. La fuente de energía proviene principalmente de combustible, GLP o CNL.

### **3.2 GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS DE ESMALTE VIDRIO PARA ESTA INVESTIGACIÓN**

Análisis del origen del residuo con el que se está realizando esta investigación, tanto su generación como el centro productivo donde se genera, este material es proporcionado gracias a la empresa de Vitrinor-Vitrispan, empresa cántabra que realiza recubrimiento de esmalte, Figura 5. VitrispanFigura 5 y Figura 6.



*Figura 5. Vitrispan*



*Figura 6. Fábrica de Vitrinor*

Lo primero que hay que destacar es que el residuo de esmalte se produce por residuo de esmalte; VITRISPAN y VITRINOR, porque estas dos empresas pertenecen al grupo VITRINOR, y ambas están comprometidas con la fabricación de revestimientos de acero esmaltado, aunque los productos de los dos son completamente diferentes, VITRINOR produce utensilios de cocina, y paneles de construcción VITRISPAN, pero ambos tienen una cosa en común, es decir, el esmalte de vítreo utilizado para revestir acero.

Debido a este punto en común, la barbotina de esmalte o el esmalte molido se procesa en la sección del molino, y el departamento suministra la lechada de esmalte a los esmaltes de las dos empresas de acuerdo con sus respectivos planes de fabricación. En esta parte del molino, el primer lote de residuos se produce principalmente en forma de aguas residuales de lavado, de las herramientas de lavado y trabajo que cambian de color del molino, bombas de pintura, tanques de inmersión de pintura, lavado del tambor de suministro de esmalte...

En la sección de molino, el esmalte molido se suministra a ambas empresas, y estos centros de producción generan nuevos residuos de esmalte. En ambas esmaltarías se generan dos tipos de residuos: residuos en polvo y aguas residuales que contienen una gran cantidad de partículas de esmalte vítreo en suspensión, similar al agua de trituración.

Ambos tipos de esmalte residuales provienen de la pérdida por inhalación debido a la proyección neumática del esmalte durante la aplicación. Hay aspiradoras en todas las salas de aplicación, estas aspiradoras están conectadas a diferentes filtros de manga, los cuales retienen las partículas de esmalte y evitan que los aerosoles que llevan partículas de esmalte se descarguen al exterior.

En el proceso de aplicación de la capa de color la superficie se contamina con esmalte y una vez seca, se limpia esa zona mediante el perfilado para poder imprimir serigrafías. La perfiladora utiliza un disco scotch-brite giratorio para limpiar el fondo, recoge el esmalte eliminado por succión, se conecta al filtro de mangas y retiene el residuo en forma de polvo. Los residuos de polvo de los dos esmaltes se almacenan en bolsas grandes de diferentes colores según el proceso de fabricación y luego se entregan al agente autorizado para su procesamiento.

También se producen en ambos tipos de esmaltes; como se mencionó anteriormente, el color de las aguas residuales producidas por la limpieza del gabinete cambia, limpieza de pistolas, bombas, tanques de inmersión... Esta agua contiene una gran cantidad de sólidos en suspensión y a causa de ellas son tratadas de forma conveniente.

La última parte del residuo se produce en el tanque de sedimentación en forma de lodos o lodos decantados, el contenido de sólidos en suspensión es alto debido a las partículas de esmalte, cuanto menor es la cantidad de este residuo, mayor es la filtración en el filtro.

Finalmente, se puede decir que tenemos tres tipos de residuos, aunque tienen la misma composición en calidad y cantidad, es decir, son homogéneos y su estado físico es diferente: residuo de polvo en estado semilíquido o pastoso, residuos de la torta de esmalte y residuos de fangos.

En total entre las dos fábricas a lo largo de un año se producen 500 toneladas, aproximadamente 200 toneladas de residuos polvo, otras 200 toneladas de residuos tortas y 100 toneladas de residuos en forma de fangos.

### **3.3 CEMENTOS Y ADITIVOS**

#### **3.3.1 HORMIGONES**

##### **ASPECTOS GENERALES DEL HORMIGÓN**

El hormigón se trata de un conglomerado artificial el cual se obtiene mezclando materiales inertes (arena, grava, gravilla) con un aglomerante y con agua, convenientemente dosificados. Esta materia inerte tiene distintos granulados y tamaños en función de las necesidades del hormigón a utilizar, y los aglomerantes, como es el cemento Portland, son materiales capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos exclusivamente químicos.

Estamos ante un material con unas propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión muy elevadas pero otro lado no es capaz de soportar esfuerzos a tracción. Esto le permite una gran cantidad de distintas utilidades, y en el caso de que vaya a soportar esfuerzos a tracción se le combina con otro material, el metal, logrando así el hormigón armado el cual será resistente a la compresión y a la tracción. Esto le convierte en uno de los materiales más utilizados por la construcción, cada vez su uso es más amplio gracias a la aparición de nuevos aditivos que le confieren propiedades especiales.

Un poco de historia sobre sus inicios, los primeros en usar este material fueron los egipcios, usando una mezcla de yesos y cales como material aglutinante. Más tarde los romanos harían un compuesto que sería el primer hormigón de la historia, estaba compuesto por caliza, agua, arena y piedras trituradas. Es tal la sofisticación del hormigón con las que los romanos trabajaban que no fue hasta el siglo XIX, con la aparición del cemento Portland, el cual atribuía una considerable mejora al hormigón, cuando se dio lugar a una nueva era en cuanto materiales de construcción (10).

El hormigón tiene muchas ventajas, una de las más inusuales es que el material llega en bruto a la obra lo que le permite que una gran facilidad a la hora de adaptarse a las necesidades de la obra. Además de la versatilidad que tiene este material debido a la existencia de distintas tipologías de hormigón (ordinario, en masa, armado, pretensado, ciclópeo, aireado...).

A todo esto, si se añade la facilidad de obtención de los materiales y la simplicidad y rapidez del proceso de fabricación, se obtiene un material económico y sin competencia alguna en el campo de la construcción.

### **3.3.2 AGUA Y ÁRIDOS**

En la fabricación del cemento el consumo de agua es muy elevado, se utiliza para controlar las emisiones de polvo al aire, refrigerar los gases calientes del horno y enfriar el producto. Esta agua empleada contiene abundantes cantidades en suspensión de compuestos dañinos para la salud y el medio ambiente.

Los áridos en el hormigón suponen alrededor de un 60% y un 75% del volumen total, los principales impactos que las actividades de extracción y/o tratamiento suponen una alteración del hábitat y la creación de polvo, como la sílice el cual es liberado siendo perjudicial para la salud. Además, el proceso de extracción conlleva el uso de maquinaria pesada la cual tiene un alto consumo de combustible lo cual aumenta las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante la fabricación y transporte del hormigón.

### **3.3.3 DEFINICIÓN DEL CEMENTO PORTLAND**

Etimológicamente, la palabra "Cemento" proviene del latín "Caementun", que significa "mortero". El término Portland, debe su nombre a la similitud en apariencia con las rocas que se encuentran en la isla de Portland en el sur de Inglaterra, que suelen ser losas profundas y grises.

De acuerdo con 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 efecto, es un material que tiene las características de solidificación y endurecimiento en presencia de agua. La reacción forma un material con buenas propiedades de adherencia.

La importancia del cemento Portland radica en que es el principal compuesto de mortero, especialmente del hormigón, que es el material más utilizado.

En Europa, la Asociación Europea del Cemento (CEMBUREAU) tiene su sede en Bruselas y es el portavoz oficial de todas las asociaciones nacionales de la industria del cemento y las empresas cementeras, ante la Unión Europea.

### 3.3.4 FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

Es importante conocer la fabricación del cemento, para nuestro trabajo de investigación se utilizará el cemento Portland. Se comienza con la obtención y preparación de la materia prima necesarias para lograr la composición deseada de óxidos metálicos para la producción de Clínker, este está compuesto de los siguientes óxidos en distintas cantidades UPC (Universitat Politècnica de Catalunya): un 60-69 % de óxido de calcio “cal” (CaO), un 18-24 % óxido de silicio “sílice”, un 4-8 % óxido de aluminio “alúmina” y óxido de hierro.

Posteriormente se realiza la molienda, la cual tiene la finalidad de reducir el tamaño de las partículas de materia prima mediante equipos mecánicos para que las reacciones químicas de cocción en el horno puedan realizarse de forma adecuada. Hay distintos procesos de fabricación del Clínker:

- Vía seca.
- Vía húmeda.
- Vía semiseca.
- Vía semihúmeda.

En el cemento Portland se utiliza, o el proceso por vía húmedo, o el proceso por vía seca.



*Figura 7. Clínker en cemento Portland.*

En el cemento Portland, la materia prima es introducida en largos hornos donde el aumento su temperatura produce una serie de cambios químicos. A medida que la temperatura aumenta el silicato de aluminio se deshidrata a la vez que el carbonato de calcio del yeso o de la caliza pierde dióxido de carbono dando lugar a la cal viva. Las temperaturas siguen aumentando,

llegando a alcanzar los 1.500 °C dando lugar a nuevas combinaciones químicas las cuales darán lugar al Clínker. En la Figura 7 se puede ver el material obtenido el cual será molido posteriormente. Obteniendo así una sustancia vitrificada que contiene óxidos de calcio, aluminio y silicio los cuales se unen y dan lugar al silicato tricálcico y aluminato tricálcico. Tras este proceso en el cual ha alcanzado muy altas temperaturas es enfriado bruscamente tras abandonar el horno (11,12).

Tras la obtención del Clínker, se realiza el último paso de la fabricación del cemento, terminando con la molienda conjunta del Clínker, yeso y otros materiales denominados “adiciones” logrando así diferentes propiedades. Esta última molienda consiste en someter a la mezcla de materiales a impactos con una elevada fuerza de compresión, lo llevarán a cabo equipos mecánicos, como pueden ser rodillos, molinos...

### **3.3.5 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND**

En primer lugar, hay que decir que para obtener cemento Portland, primero debemos obtener clínker del cemento, este mediante una serie de procesos y molienda dará lugar al cemento.

El complejo proceso de fabricación del cemento Portland está compuesto por 3 diferentes etapas principales que son las siguientes, preparación de las materias primas, la producción del clínker y la mezcla del clínker con las adiciones y su molienda. dichas etapas se explican a continuación.

#### *-Materias primas.*

Principalmente el crudo de cemento Portland está compuesto fundamentalmente por óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro, pero también contienen menores medidas óxido de sodio, óxido de potasio, óxido de manganeso, óxido de fósforo y óxido de titanio. Todos estos compuestos se obtienen a partir de la mezcla de materiales calizos, arcillosos y minerales de aluminio y/o hierro (13).

Los materiales que se obtienen como las rocas calizas tras el proceso de calcinación aportarán cemento el óxido de calcio o Por otro lado materiales arcillosos los cuales aportan el óxido de silicio.

#### *-Extracción de materiales.*

Aquí comienza el proceso de producción del cemento, comenzando en canteras de las cuales se obtendrán dichos materiales los cuales pueden ser extraídos mediante voladuras controladas, si el material es muy duro como calizas o pizarras, o mediante es cavadoras, siempre y cuando el material sea más blando como la arcilla y las marcas.

#### *-Trituración.*

Una vez realizado el primer proceso de extracción de los materiales se clasifican y se trituran mediante sistemas mecánicos de fricción y compresión en molinos de martillo, buscando obtener una granulometría adecuada. Posteriormente suele ser transportado mediante cintas transportadoras o camiones a las cementeras donde se almacenará.

#### *-Pre-hormogenización.*

Este proceso permite preparar el material almacenado para su dosificación de una forma adecuada para reducir su variabilidad.

#### *-Molienda de crudo.*

Mediante la mezcla de los materiales convenientemente dosificados se obtiene el crudo o harina de clínker, este producto es molido para reducir su tamaño y favorecer así su cocción en el horno.

#### *-Producción del clínker.*

Este material tiene un alto contenido de óxido de calcio de aproximadamente un 67%, un 22% de óxido de silicio, un 5% de óxido de aluminio y un 3% de óxido férrico (13).

#### *-Pre-calentador de ciclones.*

A la hora de alimentar el horno de calcinación se realiza mediante el precalentador de ciclones, esto consiste en que el material entra por la parte superior y va descendiendo hacia el horno, pero el material alcanza los 1000°C antes de entrar en el horno debido a los gases procedentes de él. En este proceso se produce una pérdida de agua de constitución y la descarbonatación de las calizas dando lugar a los oxidados de calcio. Este proceso viene marcado por la temperatura a la que se encuentra comenzándolo a 550°C y completándolo alrededor de los 960°C. Este proceso en función de las temperaturas se encuentra representado en la Figura 8.

#### *-Formación del clínker.*

Las reacciones de clínkerización son producidas en el horno de calcinación, para que se produzcan son necesarias altas temperaturas en él.

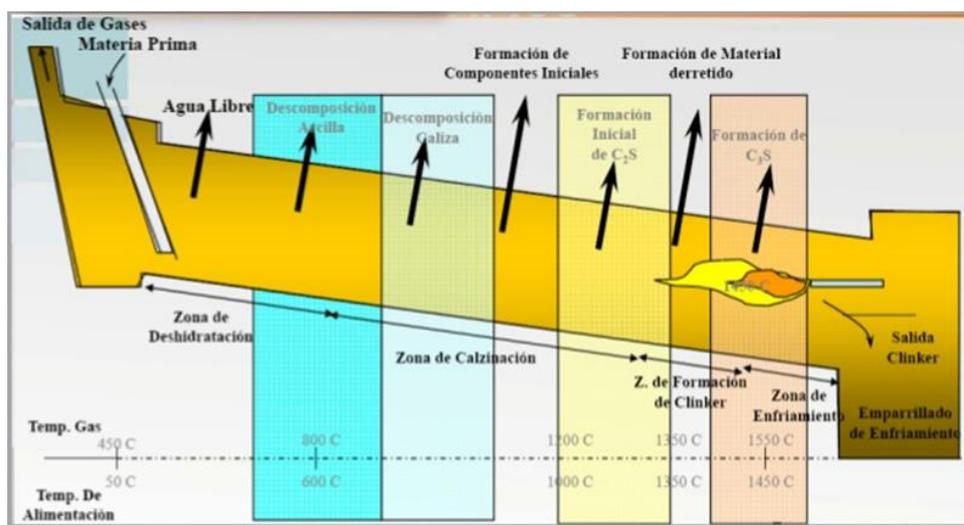


Figura 8. Reacciones de Clinkerización en función de la temperatura

Normalmente este horno es de tipo rotatorio, esto provoca que se necesite grandes cantidades de combustible para lograr una llama principal de 2.000°C.

El crudo va avanzando por el interior del horno procedente del precalentador de ciclones hasta alcanzar una temperatura de 1.500°C, es en este punto donde se producen las complejas reacciones necesarias para dar lugar al Clínker. Estas reacciones vienen representadas en la Figura 8.

Debido a que el crudo alcanza las temperaturas de entre 1.200°C y 1.300°C el óxido de calcio reacciona con el sílice generando silicato bicálcico, lo cual aporta al cemento resistencias mecánicas a largo plazo debido a su hidratación, aunque es un proceso lento (13).

A temperaturas superiores a 1.280 °C, el clínker sólido se funde y el óxido de calcio se combina con el óxido de aluminio y el óxido de hierro dando lugar al silicato tricálcico y al ferrito aluminato tetracálcico, posteriormente estos dos componentes tras alcanzar 1.380°C, funden y dan lugar a una masa de consistencia líquida llamada lava de clínker.

Esta lava dará lugar a la formación de silicato tricálcico a partir de los 1.400°C y 1.450°C, lo cual dará al cemento Portland sus características más importantes relacionadas con la resistencia y la durabilidad.

Este proceso anteriormente explicado consiste en la clinkerización mediante vía seca (humedad 0,5%-1%) ya que es el más utilizado, pero también hay otro proceso llamado vía semiseca (humedad 10%-12%), vía semi-húmeda (humedad 16%-21%) y vía húmeda (humedad 28%-43%).

-Enfriador.

Tras el proceso anterior con el clínker ya formado, tras la salida del horno éste tiene que ser enfriado. para lograr este enfriamiento se emplea un enfriador de parrillas móviles, gracias a una corriente de aire el clínker se enfría rápidamente de 1.400°C a 100°C, logrando así evitar la reversibilidad de las reacciones producidas en el horno. Por lo general para mejorar el rendimiento térmico del proceso el aire caliente generado es introducido de nuevo en el horno (14).

En este momento el clínker está formado por pequeños nódulos de color gris de entre 3 y 4 cm como se puede ver en la Figura 9.



*Figura 9. Aspecto del clínker*

#### *-Molienda de clínker y fabricación del cemento.*

Con el clínker ya enfriado se muele y una vez en este estado se le añade el yeso y las otras adiciones para conseguir cemento. tras esto, ya en función de las proporciones que se añada al material se obtendrá un cemento con unas características u otras.

Es conveniente triturar el clínker y los aditivos por separado para obtener un tamaño de grano más perfecto y una mezcla más uniforme. El molino puede ser un molino de rodillos o un molino de bolas. La bola es cilíndrica auto-giratoria, con bolas de acero de diferentes diámetros en el interior; generalmente hay tres tamaños, la bola grande rompe primero el material y la bola pequeña realiza el rectificado final.

Debido a la rotación del molino, las bolas chocan entre sí para triturar el clínker y los aditivos para obtener un polvo fino y uniforme: el cemento.

El tamaño del sólido de alimentación del molino suele ser de 25 mm de diámetro, y el diámetro del producto molido suele ser de 0,1 mm (14). Es importante ajustar bien la velocidad (rpm) del molino, porque una velocidad alta invalidará el efecto de la bola sobre el clínker y la velocidad será demasiado baja.

#### *-Almacenamiento del cemento*

Tras estos procesos el cemento se almacena en unos silos los cuales se encuentran separados según las diferentes clases.

*-Envasado y expedición a granel.*

De forma genérica los envases suelen ser de 25 o 35 kg, los cuales se transportan en camiones, ferrocarril y barco.

### **3.4 PROBLEMAS QUE PROVOCA LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND**

La industria cementera ha creado una serie de problemas ambientales y los más importantes tienen que ver con la energía consumida, así como las emisiones de gases y partículas durante su fabricación. Además, el proceso de la obtención de las materias primas conlleva la modificación total de ciertas zonas.

*-Modificación del paisaje.*

Como todos sabemos, el impacto de una fábrica El cemento se utiliza para obtener su materia prima; un paisaje se convierte en un árido desierto lleno de bulldozers. Aunque el impacto visual es difícil de cuantificar, está claro que la cantera que se extrajo no ha recuperado su integridad original.

Para comprender las dimensiones del problema, considere los siguientes datos. Para producir 100.000 toneladas de cemento se requieren 4 millones de toneladas de tierra recuperada para obtener materias primas. Si se asemeja a una colina que contiene esa cantidad de material, el resultado será un cono con una altura de 125 m y un diámetro de fondo de 250 m.

También debemos considerar el tema de los recursos minerales. Los recursos minerales son limitados, 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. Habitualmente, con el fin de minimizar el impacto en el medio ambiente, la zona será revegetada; pero también es cierto que cada día más organizaciones ambientales reclaman un control más efectivo de la cantera y su posterior restauración.

*-Emisión de partículas.*

Una de las fuentes de contaminación es la emisión de partículas en suspensión a la atmósfera. Todo el mundo conoce este efecto de suspensión en la localidad cántabra de Mataporquera por la instalación de la planta de cemento allí, afortunadamente esta situación ha cambiado mucho con el tiempo, porque en la actualidad existen muchos tipos de filtros. También hay filtros eléctricos en instalaciones de molienda y filtros de mangas en trituradoras y silos de

almacenamiento de material. Estas emisiones de polvo a la atmosfera están reguladas por el Real Decreto 100/2011.

*-Emisión de gases.*

En la actualidad existe un gran consenso científico sobre el calentamiento global, el cual es provocado principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que se traduce en graves consecuencias para ecosistemas únicos, eventos climáticos extremos, aumento del nivel del mar, desaparición de glaciares y reducción de glaciares...

Entre estos gases de efecto invernadero, podemos mencionar el CO<sub>2</sub>, metano y óxido de nitrógeno, pero en este trabajo, mencionaremos principalmente al CO<sub>2</sub> porque es el más abundante de todos estos gases de efecto invernadero.

Antes de 1750; antes de la revolución industrial, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera era de 280 ppm, y recientemente se han obtenido resultados de valores de 400 ppm. La física Lourdes Vega (Premio Innovación y Tecnología 2013 de la Real Sociedad de Física y Fundación BBVA) dijo: "El CO<sub>2</sub> 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 de cemento Portland ha sido catalogado como una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono, y a nivel mundial es el causante del 5 al 7% del total de las emisiones. Estas emisiones vienen provocadas principalmente de la combustión del horno.

La otra parte del CO<sub>2</sub> proviene del combustible necesario para obtener la alta temperatura de 2.000°C de la llama del horno para mantener la temperatura de 1.500°C en el horno. Si combinamos estas dos fuentes de emisión de CO<sub>2</sub>, producir 1 tonelada de cemento emitirá 850 kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (15).

Sin embargo, también hay que señalar que, si bien las plantas de cemento producen contaminación, su proceso de producción es favorable para la valorización de los residuos, ya sea que se utilice como materia prima para el clínker, o que se utilice para posteriores aditivos de diferentes cementos o energía.

### **3.5 ADICIONES Y TIPOS DE CEMENTOS PORTLAND**

El cemento Portland se obtiene mezclando clínker con yeso y aquellos aditivos y aditivos que agregamos según la finalidad. Básicamente podemos decir que el cemento Portland consta de núcleo, sulfato y aditivos.

El fraguado es el proceso por el cual el cemento se endurece y pierde su plasticidad, debido a la reacción química entre el agua y los óxidos metálicos presentes en el clinker, que conduce al secado y recristalización de los hidróxidos metálicos. Esta reacción química cemento-agua (hidratación) es exotérmica, libera calor y la hidratación completa depende de la composición química del clinker y de su porcentaje en el cemento.

Los aditivos suelen ser subproductos minerales de otros procesos y materiales de origen natural o artificial, los cuales son añadidos al cemento para mejorar sus propiedades físicas y químicas. El uso de estos aditivos en el clinker de cemento obedece a tres razones por conceptos diferentes: tecnología, ecología y economía. Tiene propiedades técnicas, porque el cemento con aditivos carece de algunas de las deficiencias de Portland y tiene otras ventajas que el Portland ordinario no tiene en aplicaciones específicas (16).

Desde un punto de vista ecológico, dado que el uso de estos subproductos como aditivos puede eliminar los montones de escoria, se reduce la relación de clinker a cemento, logrando así una menor producción de clinker, reduciendo así la cantidad de materias primas y las emisiones de dióxido de carbono. Además, estas adiciones consiguen reducir el coste y los gastos energéticos con lo cual hay una mejora económica.

Las adiciones se pueden clasificar como activas e inactivas, dentro de las activas se encuentran la hidraulicidad latente, la cual está formada por escoria de altos hornos, y además de los puzolánicos como aditivos activos los cuales tienen un origen natural o volcánico. Por otro lado, adiciones inactivas como el filler calizo.

#### *-Escorias de altos hornos.*

Es formada a consecuencia de la siderurgia producida a consecuencia de la reacción en el alto horno de la mena del mineral de hierro, de la ganga de dicho mineral, el coque y del fundente, obteniendo el arrabio. Debe ser granulada, este proceso se realiza mediante el brusco enfriamiento con agua a presión lo cual hace que permanezcan sus componentes minerales en estado vítreo, por otro lado, si es secado al aire libre pierde esta propiedad y su estructura ya no es vítrea (16).

#### *-Materiales puzolánicos.*

Son materiales silíceos o aluminio silíceos, cuando éstos son mezclados con agua crean una reacción química formando compuestos cementantes.

Dentro de este material podemos diferenciar entre, las puzolanas naturales cuyo origen es volcánico como las rocas todas o las tierras de diatomeas, las cenizas volantes procedentes de los hornos de los cuales se obtiene energía empleando carbón, su composición química es variable, dependiendo del carbón de procedencia pero similares a los minerales de la arcilla, y

por último, humo de sílice que es un material que se origina por la reducción de cuarzo con carbón para la fabricación de aleaciones.

Las ediciones al clínker no son mayores del 10%.

*-Filler calizo.*

Está compuesto principalmente por carbonato de calcio el cual se añade al cemento o se muele con el clínker, este material es muy fino y mejora las propiedades en morteros y hormigones frescos.

### **3.6 MORTEROS Y MORTEROS AUTONIVELANTES**

#### **3.6.1 EL MORTERO**

Es una mezcla de aglutinante inorgánico, agregado fino y agua, así como posibles aditivos los cuales proporcionan al mortero unas cualidades específicas, cualidades como de fluidez o de mejor adhesión entre materiales. Los más comunes son los de cemento, que consisten en cemento, áridos finos y agua, como los que se usan en esta investigación formados por cemento Portland ya he explicado anteriormente.

Tiempo de uso está definido como el tiempo que tarda el mortero en tener suficiente trabajabilidad sin necesidad de posterior adición de agua para compensar el efecto de endurecimiento, es la norma europea UNE-EN 1015-9.

La consistencia del nuevo mortero elaborado con aglutinantes minerales y áridos ordinarios y ligeros se determina mediante una mesa vibratoria, y sus procedimientos de funcionamiento cumplen con la norma europea UNE-EN 1015-3. La consistencia se expresa por el escurrimiento experimentado por la muestra de mortero de prueba en milímetros. Los morteros frescos se clasifican y nombran de acuerdo con su consistencia, como se puede observar en la siguiente tabla se clasifican de la siguiente manera, Tabla 2, (17).

*Tabla 2. Clasificación de los moteros.*

Mortero Fresco	Consistencia, Escurrimiento, mm
Seco	<140
Plástico	140 a 200
Fluido	>200

La resistencia mecánica qué más se busca en este material es la relacionada a la compresión, debido a que es de esta manera cómo trabajará el material una vez aplicado, los ensayos se

determinan a 7 y 28 días sobre una serie de probetas con unas medidas estandarizadas de 40x40x160 mm, curadas e hidratadas de acuerdo con el procedimiento estipulado por la norma europea UNE-EN 1015-11.

El curado de las probetas se hace en atmósfera húmeda a 20°C aproximadamente y una humedad relativa del 95%, durante los primeros 7 días se conserva en el molde o fuera de él pero pasado este tiempo y durante los siguientes 21 días se conservará fuera del molde a una temperatura similar pero a una humedad aproximada del 65 (17).

### **3.6.2 MORTERO AUTONIVELANTE**

El mortero autonivelante se refiere a un mortero a base de arena y cemento, que contiene una serie de aditivos para que se distribuya uniformemente en la superficie. La superficie irregular se llena con este líquido y se acumula en la parte más profunda. De esta forma, el suelo obtendrá una superficie plana.

Para lograr este material se parte del mortero habitual formado por cemento, arena y agua, pero añadiéndole una serie de aditivos que le proporcionarán mayor fluidez al mortero resultante logrando de esta manera su propiedad autonivelante. El filler, en esta investigación el filler calizo, es el aditivo que le proporcionará dicha cualidad.

El filler es un producto finamente molido, esencialmente árido calizo, con un rango de tamaño de partícula de 45 a 300 micrones (1 mm = 1000 micrones). Al determinar la dosis adecuada en función de su tamaño de partícula, pueden mejorar las propiedades físicas de las mezclas de cemento y asfalto y retrasar su envejecimiento.

**4 MATERIALES Y ENSAYOS  
DE MORTEROS**

## 4 MATERIALES Y ENSAYOS DE MORTEROS

Esta investigación está formada por 3 principales fases, primero se comienza con la creación de morteros buscando la sustitución del cemento Portland y creando probetas con las siguientes relaciones de cemento-residuo: 0%, 25%, 50% y 75% de residuo, al realizar los ensayos a estas probetas se decide realizar otra fase con distintas relaciones de cemento-residuo para lograr los resultados más prácticos, usando las siguientes relaciones: 5%, 10%, 15% y 20% de residuo. Por último, la tercera fase, que consta de la creación y ensayos de probetas de mortero autonivelante en las cuales se sustituye el filler calizo por filler residuo de la siguiente manera: 0%, 25%, 50% y 100% con filler residuo.

La realización de los distintos morteros con distintos porcentajes de cemento- residuo o filler calizo-residuo, y los ensayos de flexión y compresión y de escurrimiento necesarios para esta investigación han sido realizados en el laboratorio de LADICIM en la Facultad de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en la Universidad de Cantabria.

### 4.1 MATERIALES

Las materias primas que se han utilizado en el proceso de elaboración de las probetas son los siguientes, aunque hay que tener en cuenta que solo el mortero autonivelante posee aditivos y filler calizo. Estos materiales han sido por el departamento de la Universidad de Cantabria de LADICIM, salvo el esmalte que ha sido obtenido gracias a Vitrinor-Vitrispan.

- Cemento, Tipo I Clínter-Portland CEM I 52,5 R, posee una densidad de  $3 \text{ g/cm}^3$  (Figura 10).
- Arena de sílice, arena fina  $\text{SiO}_2$  de con un tamaño máximo de grano de 2 mm (Figura 12).
- Agua potable libre de sustancias perjudiciales que no alteran las propiedades de la mezcla, provenientes del laboratorio de LADICIM.
- Residuo, esmalte vitrificado, lote de 20 kg de residuo polvo (Figura 14).
- Filler calizo con un tamaño de partículas inferior a 64 micras (Figura 10).
- Aditivos superplastificante, el utilizado es Master Ease 5025.



Figura 10. Filler calizo.



Figura 11. Cemento Portland



Figura 12. Esmalte vitreo superior a la izquierda, cemento Portland superior a la derecha, agua en el medio y arena fina en la parte inferior.

A la hora de realizar las probetas con las cuales se harán los ensayos poseen una humedad y densidad específicas, para calcular dicho valor se utiliza un matraz de Le Chatelier mediante el cual se calcula el volumen, una báscula de precisión para obtener el peso y una estufa para secar el material. de esta manera y con los siguientes resultados se obtiene la densidad y humedad de los siguientes materiales. La densidad obtenida se muestra en la Figura 2. Con estos valores para obtener el valor de la densidad y la humedad se han usado las siguientes ecuaciones:

$$\rho = \frac{\Delta \text{Peso}}{\Delta \text{Volumen}}$$

$$\text{Humedad} = \frac{P_{hm} - P_s}{P_s} \cdot 100$$

Siendo  $P_{hm}$  el peso del material húmedo y  $P_s$  el peso del material seco.

Tabla 3. Densidades obtenidas para los materiales utilizados.

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	% Humedad
Arena fina	2,63	0,38
Filler	2,72	1,25
Residuo	2,64	0,72



Figura 13. Matraz de Chartelier

Para el cálculo de la humedad tras estar una hora en la estufa de secado a una temperatura de 100°C.

## 4.2 PROCESO DE CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL ESMALTE VITRIFICADO

El residuo ensayado es de un lote de 20 kg de residuo polvo, tiene un color rojizo debido a los componentes del residuo con un alto contenido de hierro, esta tonalidad se puede apreciar claramente en la Figura 14.



*Figura 14. Residuo, esmalte vítreo.*

Si bien el microscopio electrónico de barrido es empleado para obtener imágenes a grandes magnificaciones de casi todos los materiales, también se puede emplear en combinación con un espectrómetro de energía dispersiva (EDX), también permite conocer los elementos presentes en secciones específicas de una muestra.

Para ello se ha utilizado un SEM de presión variable modelo Carl Zeiss EVO MA15 equipado con un detector de rayos X de Oxford Instruments (Figura 15). Puede funcionar en condiciones de bajo vacío y utiliza un filamento de hexaboruro de lantano como fuente de electrones y detectores de electrones secundarios y retrodispersados. El microscopio está provisto de un detector EDX para determinar la composición química elemental.



Figura 15. Imagen del microscopio electrónico de barrido (SEM).

El tipo de análisis realizado ha sido un análisis general de una parte de la muestra previamente pulverizada y secada (análisis de área). El haz de electrones se barre sobre un área específica de interés previamente seleccionada en la imagen y se colectan los rayos X. La composición obtenida corresponde a un promedio del área analizada. Estos análisis se han realizado con dos muestras de residuo para comprobar la homogeneidad del material.

En la Tabla 4 Tabla 4. Ensayo de caracterización química para la muestra 1. se muestran los resultados obtenidos para la muestra 1.

Tabla 4. Ensayo de caracterización química para la muestra 1.

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Fórmula
F K	10,46	11,60	0	
Na K	8,40	7,70	11,32	Na <sub>2</sub> O
Al K	3,38	2,64	6,39	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si K	26,51	19,89	56,72	SiO <sub>2</sub>
K	3,83	2,07	4,62	K <sub>2</sub> O
Ca K	1,20	0,63	1,69	CaO

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Fórmula
Ti K	2,98	1,31	4,97	TiO <sub>2</sub>
Mn K	1,30	0,50	1,68	MnO
Fe K	1,68	0,63	2,16	FeO
O	40,25	53,02	-	-
Total	100,00	-	-	-

### Quantitative results

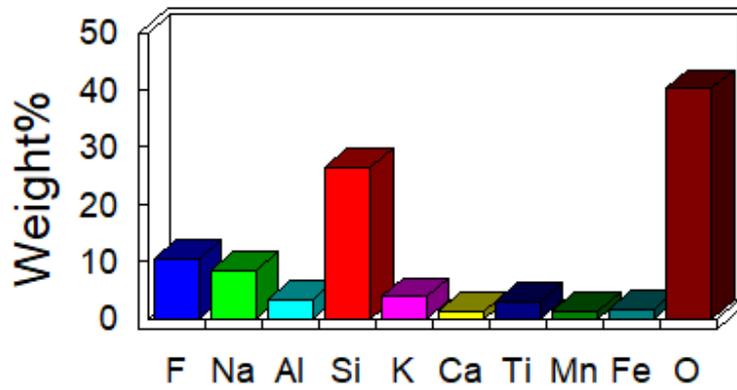


Figura 16. Histograma de composiciones de la muestra 1.

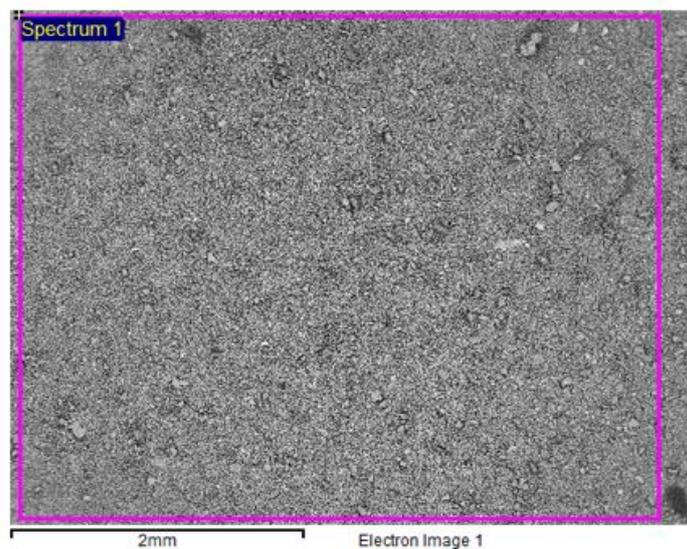


Figura 17. Micrografía de la muestra 1.

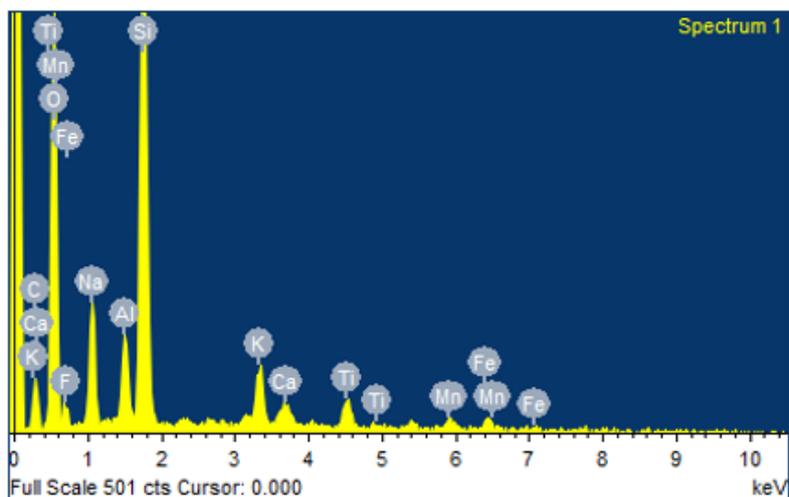


Figura 18. Espectro energético de la muestra 1.

En la Tabla 5Tabla 4 Tabla 4. Ensayo de caracterización química para la muestra 1.se muestran los resultados obtenidos para la muestra 2.

Tabla 5. Ensayo de caracterización química para la muestra 2.

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Fórmula
F K	6,63	7,44	0	
Na K	8,28	7,68	11,16	Na <sub>2</sub> O
Al K	3,60	2,85	6,81	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si K	27,15	20,61	58,08	SiO <sub>2</sub>
K	4,48	2,44	5,39	K <sub>2</sub> O
Ca K	1,48	0,79	2,06	CaO
Ti K	2,87	1,28	4,79	TiO <sub>2</sub>
Mn K	1,68	0,65	2,17	MnO
Fe K	2,27	0,87	2,91	FeO
O	41,58	55,41	-	-
Total	100,00	-	-	-

## Quantitative results

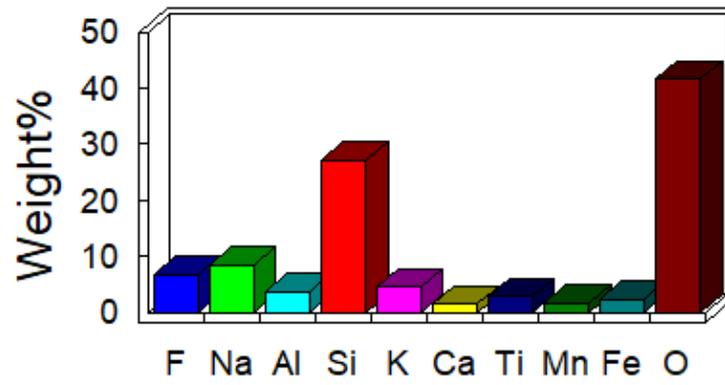


Figura 19. Histograma de composiciones de la muestra 2.

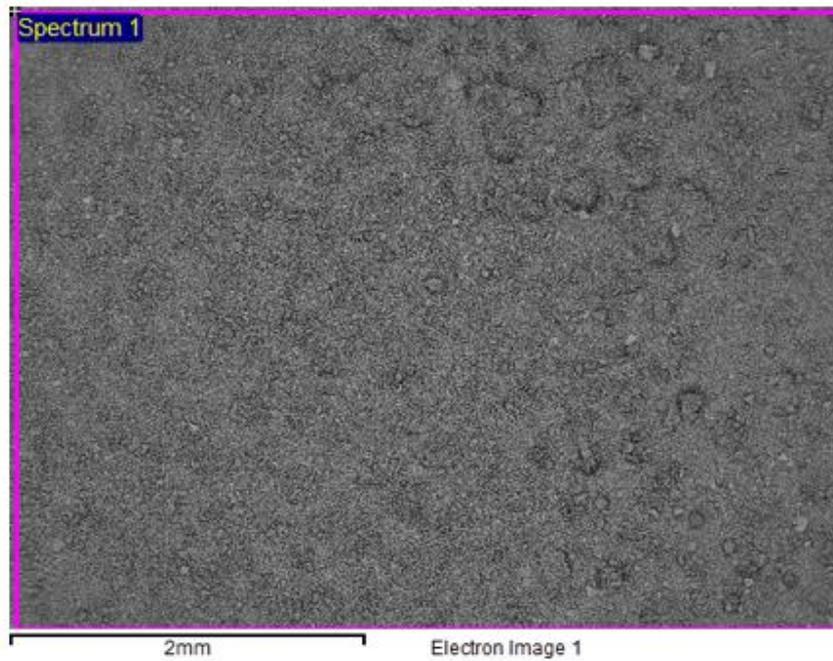


Figura 20. Micrografía de la muestra 2.

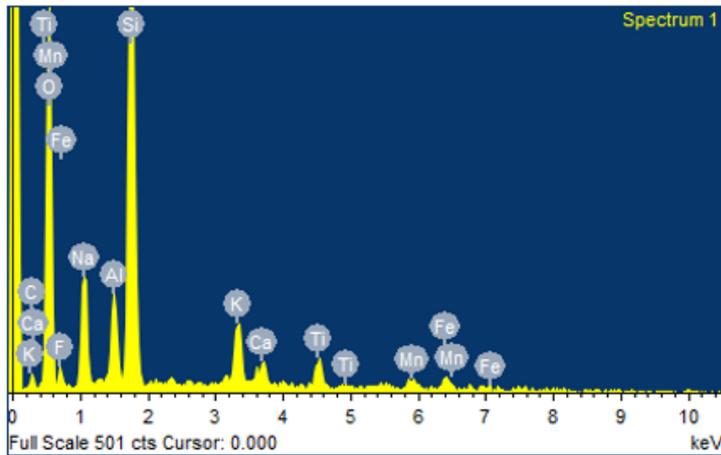


Figura 21. Espectro energético de la muestra 2.

Tras estos análisis se comprueba que el esmalte vítreo que se ha utilizado posee un material principal que es el óxido de silicio con alrededor de un 57% en su composición, otro material que se encuentra, pero a menor medida es el óxido de sodio con un 11%.

Por otro lado, el análisis del contenido en boro se ha llevado a cabo por la Unidad de Transferencia Sosprocan, Unidad de sostenibilidad de la producción de Cantabria, perteneciente a la Universidad de Cantabria dentro del departamento de ingenierías química y biomolecular. El ensayo se ha solicitado para determinar la cantidad de boro en el esmalte, esto se ha realizado únicamente en una de las muestras, debido a que como ambos resultados son casi idénticos se sabe que el residuo tiene una composición muy homogénea.

Para realizar dicho ensayo se ha empleado la técnica analítica Espectrómetro MP-AES, mediante los equipos 4210 Agilent, pertenecientes a este departamento ya citado.

Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas, además de dicho informe también se extrae una imagen ampliada, los resultados cuantitativos gráficamente y las imágenes resultantes del espectro obtenido.

De forma genérica al residuo se le analizó su cantidad de boro y gracias a su homogeneidad demostrada con los dos ensayos anteriormente realizados se puede asegurar que la cantidad de este último componente será homogénea para ello también.

La causa de que no se analizará la cantidad de boro en todos los ensayos realizados es su elevado precio, y además comprobando que no es necesario debido a la homogeneidad del material.

Según la composición de la muestra utilizada para el análisis de la cantidad de boro obtenemos la Tabla 6. El residuo presenta este componente en su forma oxidada,  $B_2O_3$ .

Tabla 6. Boro en el residuo.

Muestra	B (%)	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
Big Bag	4,19	13,48

A causa de que facilitar el entendimiento de las tablas Tabla 4 y Tabla 5, se realiza la siguiente aclaración en la Tabla 7.

Tabla 7. Formulación.

Fórmula	Formulación
Na <sub>2</sub> O	óxido de sodio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	alúmina
SiO <sub>2</sub>	óxido de silicio
K <sub>2</sub> O	óxido de potasio
CaO	óxido de calcio
TiO <sub>2</sub>	óxido de titanio
MnO	óxido de manganeso
FeO	óxido ferroso

## 4.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS MORTEROS

### 4.3.1 FASE 1: MORTEROS CONVENCIONALES

En esta fase se irá variando la relación cemento-residuo para posteriormente comprobar sus cualidades mecánicas, principalmente se harían ensayos con 0%, 25%, 50% y 75% de esmalte. Para dicha elaboración se seguirá con el siguiente procedimiento, que corresponde con la norma UNE-EN 196-1, este procedimiento se explica más adelante.

Para la obtención de las probetas se realiza la siguiente Tabla 8 con las dosificaciones en gramos apropiadas para cada muestra en relación del porcentaje de residuo que posee.

Tabla 8. Dosificación Probetas 0%, 25%, 50% y 75% de residuo.

Muestra	Cemento (%)	Cemento (g)	Residuo (%)	Residuo (g)	Agua (g)	Arena fina (g)
1	100	500	0	0	250	1500
2	75	375	25	125	250	1500
3	50	250	50	250	250	1500
4	25	125	75	375	250	1500

Debido a estas distintas dosificaciones obtenemos materiales distintos y esto se aprecia por las distintas tonalidades rojizas que tiene cada probeta, a medida que se aumenta el porcentaje de residuo en la probeta más rojiza se vuelve, se aprecia en la Figura 22.



Figura 22. Probetas de la fase 1 desmoldadas y con sus respectivos porcentajes de residuo.

#### 4.3.2 FASE 2: MORTEROS CONVENCIONALES MODIFICADOS

Esta fase surge a causa de buscar los mejores resultados para la investigación y los más aplicables, de esta manera se realizan probetas variando la relación de cemento-residuo como se ha hecho anteriormente, pero esta vez con porcentajes más reducidos del residuo, las relaciones a utilizar son las siguientes, Tabla 9.

Tabla 9. Dosificación de las probetas convencionales modificadas.

Muestra	Cemento (%)	Cemento (g)	Residuo (%)	Residuo (g)	Agua (g)	Arena fina (g)
1	95	475	5	25	250	1500
2	90	450	10	50	250	1500
3	85	425	15	75	250	1500
4	80	400	20	100	250	1500



Figura 23. Probetas con 5%, 10%, 15% y 20% de residuo de la fase 2.

### 4.3.3 FASE 3: MORTEROS AUTONIVELANTES

Se comienza por la dosificación que se va a llevar a cabo en cada una de las distintas probetas, estas dosificaciones tienen que ser calculadas. Para comenzar con los cálculos se parte de las dosificaciones que se utilizarían de forma predeterminada para morteros autonivelantes que es la siguiente.

Tabla 10. Dosificación de las probetas con 0% y 25% de reemplazo.

% Residuo /	0%		25%	
	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>
Cemento	503,1	167,7	503,1	167,7
Agua	358,1	358,1	358,1	358,1
Arena de sílice	1432,6	544,7	1432,6	544,7
Filler calizo	500	183,8	375	137,9
Filler residuo	-	-	125	47,5
Aditivo	7,5	6,9	7,5	6,9
Total	2801,3	1261,2	2801,3	1262,8

Tabla 11. Dosificación de las probetas con 50% y 100% de reemplazo.

Material/	50%		100%	
	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>
% Residuo				
Cemento	503,1	167,7	503,1	167,7
Agua	358,1	358,1	358,1	358,1
Arena de sílice	1432,6	544,7	1432,6	544,7
Filler Calizo	250	91,1	-	-
Filler Residuo	250	95,1	500	190,1
Aditivo	7,5	6,9	7,5	6,9
Total	2801,3	1264,8	2801,3	1267,5

Al realizar este primer intento para la creación de las probetas se observa que el filler residuo absorbe más agua que el filler calizo. Es por ello por lo que a partir de ahora para obtener probetas propias de un mortero autonivelante va a haber que añadir agua en función de cuánto más residuo se está utilizando es por ello que para las probetas con 25% de filler residuo se

añade 169 ml de agua, para la siguiente con un 50% de filler residuos se añade 329 ml de agua y por último para la probeta con 100% de filler esmalte se añaden 639 ml de agua, obteniendo la siguiente tabla con la que finalmente se realizarán las probetas, Tabla 12.

Tabla 12. Dosificaciones de los morteros autonivelantes de 0% y 25% de filler residuo.

Material/	0%		25%	
	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>
% Residuo				
Cemento	503,1	167,7	503,1	167,7
Agua	358,1	358,1	374,1	374,1
Arena de sílice	1,432,6	544,7	1,432,6	544,7
Filler calizo	500,0	183,8	375,0	137,9
Filler residuo	-	-	125,0	47,5
Aditivo	7,5	6,9	7,5	6,9
Total	2.801,3	1.261,2	2.817,3	1.278,8

Tabla 13. Dosificaciones de los morteros autonivelantes de 50% y 100% de filler residuo

Material/	50%		100%	
	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	l/m <sup>3</sup>
% Residuo				
Cemento	503,1	167,7	503,1	167,7
Agua	390,1	390,1	421,1	421,1
Arena de sílice	1,432,6	544,7	1,432,6	544,7
Filler Calizo	250,0	95,0	-	-
Filler Residuo	250,0	95,0	500,0	190,1
Aditivo	7,5	6,9	7,5	6,9
Total	2.833,3	1.299,5	2.864,3	1.330,5



Figura 24. Probetas de mortero autonivelante con 0% de filler residuo.



Figura 25. Probetas de mortero autonivelante con 25%, 50% y 100% de filler residuo.

#### 4.4 FABRICACIÓN DE LOS MORTEROS

A la hora de la creación de las probetas es importante tener en cuenta que los morteros y los morteros autonivelantes no se fabrican exactamente de la misma manera, la principal diferencia se encuentra en que a la hora de realizar el amasado de los materiales para el caso del mortero se introduce en el recipiente de acero inoxidable el cemento y el residuo, pero en los morteros autonivelantes en dicho recipiente se añade el cemento, el filler calizo y el filler residuo. Los pasos que seguir para dicha fabricación siguiendo la normativa UNE-EN 196-1 son los siguientes:

1. Se comienza la elaboración de dichas probetas introduciendo el residuo en una estufa de secado durante 24 horas a 100 °C, al comienzo de dicha prueba el esmalte poseía un 2,74% de humedad, tras este tiempo se obtiene un resultado de 0,58% de humedad en el material. Con dicha humedad se trabajará durante la realización de las probetas.



*Figura 26. Estufa de secado.*

2. Para obtener los porcentajes entre cemento y residuo se pesará en una balanza de presión cada material utilizado (cemento, agua, arena y esmalte vitreo). Las siguientes fotos certifican las cantidades exactas utilizadas en la fabricación de las probetas, próximas a las especificadas en la dosificación, las siguientes imágenes son las pesadas únicamente de la creación de las probetas para la fase 1, a pesar de ello son representativas para el resto de las fases, pero con distintos porcentajes, estas pesadas están representadas en Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34 y *Figura 35*.



Figura 27. 250 g de agua.



Figura 28. 1500 g de arena fina.

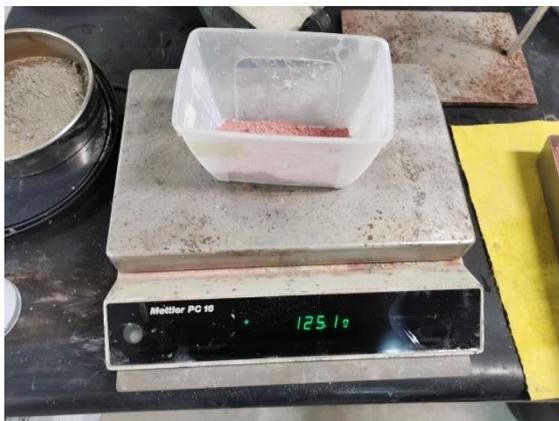


Figura 29. 125 g de residuo.



Figura 30. 250 g de residuo.



Figura 31. 375 g de esmalte.



Figura 32. 125 g de cemento.

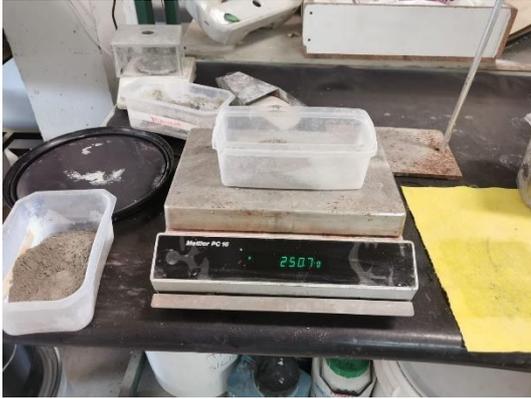


Figura 33. 250 g de cemento.



Figura 34. 375 g de cemento.



Figura 35. 500 g de cemento.

Una vez realizadas todas las mediciones se comienza con el amasado en una amasadora de morteros, los siguientes casos son para la realización de morteros, en caso de realizar morteros autonivelantes en el comienzo del amasado se añadiría también el filler calizo o filler residuo en el recipiente de acero inoxidable.

- a. Primer se enciende la amasadora a su velocidad lenta durante 30 segundos, durante este proceso se añade al agua de forma medida, tras haber añadido previamente en el recipiente de acero inoxidable de la máquina el cemento y el residuo.
- b. Inmediatamente tras esos 30 segundos se introduce la arena de sílice en la mezcla.
- c. Pasados este tiempo, se aumenta la velocidad de la máquina durante otros 30 segundos, siempre evitando que el material se adhiere a las paredes del recipiente, para ello se usa una espátula metálica.



Figura 36. Amasadora de Mortero.

- d. separa la amasadora durante 90 segundos antes de realizar el último paso.
  - e. para finalizar con el amasado se realiza una última batida a velocidad rápida durante 60 segundos logrando así la homogeneidad en el material.
3. Posteriormente a estos pasos y de forma inmediata se realiza el enmoldado de las probetas, esto se realiza en un molde normalizado como el que se ve en la Figura 37. Molde normalizado.. Para ello se rellenan los moldes representados entre la Figura 38 y la Figura 41, este primer llenado solo se realiza hasta la mitad de dicho molde una vez se ha realizado esto se vibra o sacude el molde para lograr eliminar las burbujas de aire y buscar su homogeneidad. Tras esto se realiza el llenado total de los moldes y se repite la operación anterior de vibrado eliminando con una espátula metálica el sobrante de material dejando una superficie lisa y uniforme.

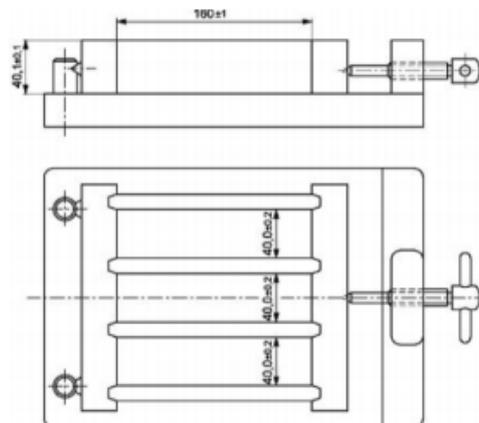


Figura 37. Molde normalizado.



*Figura 38. Moldes al 50% de llenado sin vibración.*



*Figura 39. Moldes al 50% de llenado tras el vibrado.*



*Figura 40. Moldes al 100% de llenado sin vibración.*



*Figura 41. Moldes al 100% de llenado tras el vibrado y 0% residuo.*

A causa del aumento del uso de esmalte vítreo las probetas adquieren un tono rojizo, un claro ejemplo es en la fase 1 con la Figura 42, la Figura 43 y la Figura 44, moldes rellenos de mortero con 25%, 50% y 75% de residuo. En la fase 2 con los moldes con 5%, 10%, 15% y 25% de esmalte vítreo sucede lo mismo, pero en menor medida, y en cuanto a la fase 3, los morteros autonivelantes dan unas tonalidades algo distintas a causa del que la cantidad de residuo usada con respecto el total de las probetas es inferior, es se aprecia en la Figura 45, la Figura 46 y la Figura 47.



*Figura 42. Moldes al 100% de llenado tras el vibrado y 25% residuo.*



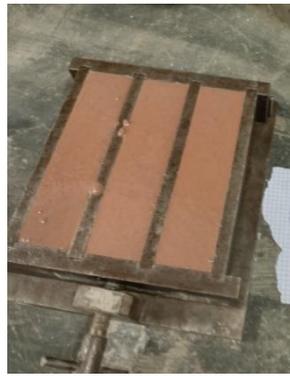
*Figura 43. Moldes al 100% de llenado tras el vibrado y 50% residuo.*



*Figura 44. Moldes al 100% de llenado tras el vibrado y 75% residuo.*



*Figura 45. Mortero autonivelante 25% filler residuo.*



*Figura 46. Mortero autonivelante 50% filler residuo.*



*Figura 47. Mortero autonivelante 100% filler residuo.*

En el caso de los morteros autonivelantes no se realiza el vibrado ya que no es necesario, pero por loco contrario en este tipo de fabricaciones es necesario obtener la torta mediante la cual se obtienen unas dimensiones que clasificarán el material como más o menos fluido. Para obtener dicha dimensión se realiza el ensayo de escurrido del mortero en la mesa de sacudidas, Figura 48 y Figura 49, realizando el llenado del cilindro en el cual se verterá el material y posteriormente se retirará dicho cilindro y el mortero fluye por encima de la mesa obteniendo la torta y realizando la medición de su diámetro. para que dicho mortero sea válido las dimensiones de la torta deben estar entre 20 cm y 30 cm.



Figura 48. Mesa de sacudidas y cilindro medido.



Figura 49. Mortero fluyendo sobre la mesa de sacudidas.

4. Estos moldes rellenos de material se dejan reposar en el laboratorio durante 24 horas a temperatura ambiente,



Figura 50. Probetas de mortero secas tras 24 horas, en este caso 0% de residuo.

5. Tras estas 24 horas se realiza el último paso de obtención de las probetas que consiste en el desmoldeo. Para realizar esta operación se afloja el tornillo que posee el molde y posteriormente se separan las paredes de las probetas utilizando un martillo y dando suaves golpes, siempre teniendo en cuenta no dañar las probetas. Las probetas resultantes de este proceso son las siguientes, de la fase 1 la Figura 22, la fase 2 la Figura 23, y la fase 3 la Figura 24 y la Figura 25.
6. Una vez tenemos las probetas de forma individualizadas se introducen en agua durante el tiempo de curado que será de unos 7 días para el primer ensayo y de 28 días para el segundo para cada conjunto de probetas. De esta manera logramos un curado a 28

días suficientemente representativo en cuanto a las propiedades mecánicas que se obtendrían con respecto al curado que se podría llegar a obtener dejándolo más tiempo.

Tras obtener las probetas de forma tras el desmoldeo y de forma previa a introducirlas en el agua, se realiza un análisis visual, la probeta de mortero con 75% de residuo se la posee una consistencia notablemente arcillosa, a causa de ello sufrió varias roturas antes de la realización de los ensayos.

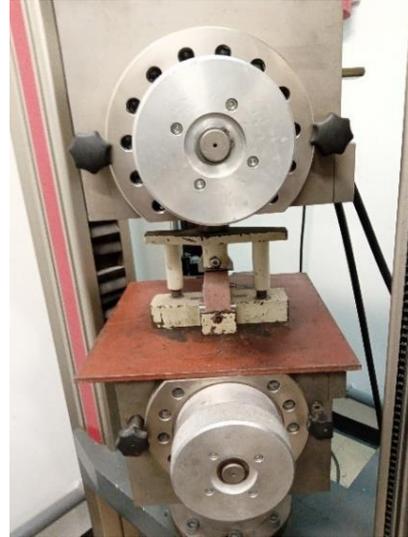
## **4.5 ENSAYOS SOBRE MORTEROS**

La resistencia mecánica de las probetas se realizará mediante un ensayo a flexión y otra compresión con una probeta pasados 7 días de curado, posteriormente tras 28 días se realizarán las mismas pruebas, pero esta vez con dos probetas en vez de una de cuyos resultados se realizará una media. Los ensayos a flexión se realizan con la probeta completa, pero la compresión se realizará de forma doble con las dos mitades obtenidas tras los ensayos de flexión, de los resultados obtenidos con cada mitad se realiza una media para obtener el valor de compresión de cada probeta.

La normativa que seguir para todos los ensayos mecánicos es la norma europea UNE-EN-1015-11, en esta ella se especifica la velocidad a la que tiene que avanzar el hidráulico a la hora de realizar la carga, esta velocidad es distinta para los ensayos de flexión y los de compresión siendo 0,05 mm/s y 0,1mm/s respectivamente. En esta normativa también se incluyen una serie de útiles necesarios para llevar las pruebas acabo, el de flexión consiste en una guillotina que realiza la carga sobre la probeta la cual está apoyada únicamente en sus extremos, la Figura 51y Figura 52, el de compresión es la el cual ejerce la carga sobre probeta con una superficie de 40x40 mm, 1600 mm<sup>2</sup>, representado en la Figura 53.



*Figura 51. Útil de flexión.*



*Figura 52. Ensayo a Flexión con unas de las probetas.*



*Figura 53. Útil de compresión.*

El ensayo realizado para calcular la resistencia a flexión en la fase 1 tras 7 días se determina mediante el equipo Zwick-Reellz-100, este equipo tiene una capacidad de carga de 10 toneladas y se encuentran conectadas a un equipo informático mediante el cual la máquina recibirá las indicaciones para los ensayos y proporcionará los resultados gráfica y analíticamente.

Por otro lado, en el resto de los ensayos de la fase 1 y en todos los de la fase 2 y 3 realizados se utiliza la prensa servohidráulica de marca INSTRON con una capacidad de 200 kN, la cual también se encuentra conectada a un monitor el cual proporciona los datos.

Todos los datos que proporcionan estas máquinas son en kN, es por ello que para trabajar en el sistema internacional es necesario que este en MPa, para lograr esto se aplican las siguientes ecuaciones en función de si es para resultados de flexión o de compresión.

- A flexión:

$$Rf = \frac{1,5 * Ff * L}{b^3}$$

Donde:

- b es el lado de la sección cuadrada del prisma (mm).
- $F_f$  es la carga aplicada en el centro del prisma en la rotura (N).
- L es la distancia entre apoyos (mm).

Las medidas de las probetas son  $L=100\text{mm}$  y  $b=40\text{mm}$ .

- A compresión:

$$Rc = \frac{Fc}{b^2}$$

- Siendo b el lado de la sección cuadrada del prisma,  $b=40\text{mm}$ .

En la fase 3 debido a que se trata de un mortero autonivelante se realiza un tercer ensayo, el ensayo de escurrido, este proceso ya está explicado en el apartado 4.3 y representado con una serie de imágenes, Figura 48 y Figura 49.

# 5 ANÁLISIS GENERAL Y RESULTADOS DEL MORTERO

## 5 NÁLISIS GENERAL Y RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Para la obtención de los resultados no sean utilizado los mismos métodos en las 3 fases, tanto en la fase 1 como en la fase 2 se realizan ensayos mecánicos a flexión y a compresión tras 7 y 28 días de curado, mientras que en la fase 3 además de realizar los ensayos al igual que en las anteriores fases, también se realiza un ensayo de escurrido. Es importante resaltar que las gráficas presentadas para la fase 1 y la fase dos son comunes, ya que la creación de todas esas probetas forma una curva más apropiada.

### 5.1 FASE 1: MORTEROS CONVENCIONALES

En esta fase se han realizado 4 juegos de probetas con distintas relaciones de cemento-residuo, esto se ha realizado para encontrar el porcentaje máximo que se puede añadir al cemento sin perjudicial de forma importante sus capacidades mecánicas. Las relaciones utilizadas de cemento-residuo para esta fase son las siguientes, 0%, 25%, 50% y 75% de residuo.

#### 5.1.1 RESISTENCIA A FLEXIÓN

Los resultados obtenidos tras 7 días de curado son los siguientes, Tabla 14.

*Tabla 14. Resultados fase 1 a flexión 7 días.*

7 días	Flexión	
	kN	MPa
ME 0%	3.92	9.19
ME 25%	2.63	6.16
ME 50%	1.52	3.56
ME 75%	0.59	1.37

Gráficamente los resultados, Figura 54.

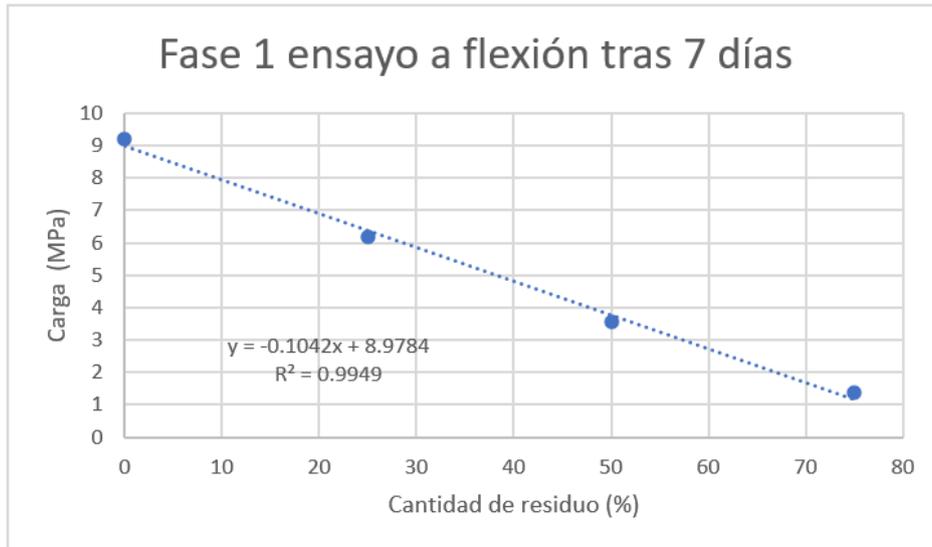


Figura 54. Resultados fase 1 a flexión 7 días.

Tras los 28 días de curado estos son los resultados, Tabla 15.

Tabla 15. Resultados fase 1 a flexión 28 días.

28 días % Residuo	Flexión	
	kN	MPa
ME 0%	4,51	10,57
ME 25%	3,75	8,78
ME 50%	2,67	6,26
ME 75%	-	-

En la Figura 55 se muestran los resultados obtenidos para los ensayos a 28 días de edad, en esta gráfica no se representa a los valores para las probetas con 75% de residuo ya que eran muy débiles se fracturaron antes del ensayo.

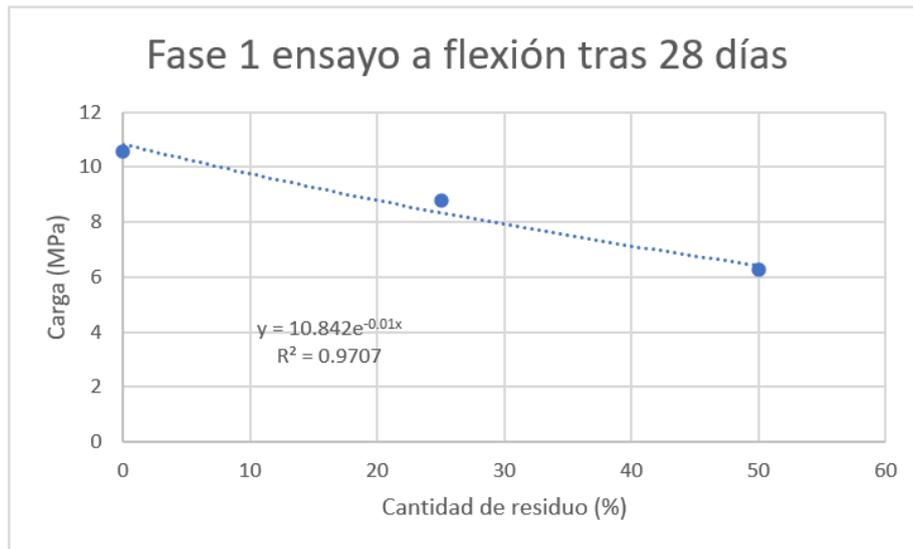


Figura 55. Resultados fase 1 a flexión 28 días.

Cabe analizar que el reemplazo de residuo por cemento de Portland lleva asociada una pérdida de las resistencias mecánicas que es casi proporcional a la cantidad de residuo reemplazado. Estas pérdidas alcanzan el 40% en la resistencia a flexión para reemplazos del 50% a la edad de 28 días.

### 5.1.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Los resultados obtenidos tras 7 días de curado los resultados son los siguientes, Tabla 16.

Tabla 16. Resultados fase 1 a compresión 7 días.

7 días	Compresión	
	kN	MPa
ME 0%	55,20	34,50
ME 25%	42,55	26,59
ME 50%	20,15	12,59
ME 75%	7,75	4,84

En la Figura 56 se muestran los resultados gráficamente, donde puede apreciarse un buen ajuste exponencial y la pérdida de resistencia a compresión conforme aumenta el reemplazo de cemento por residuo

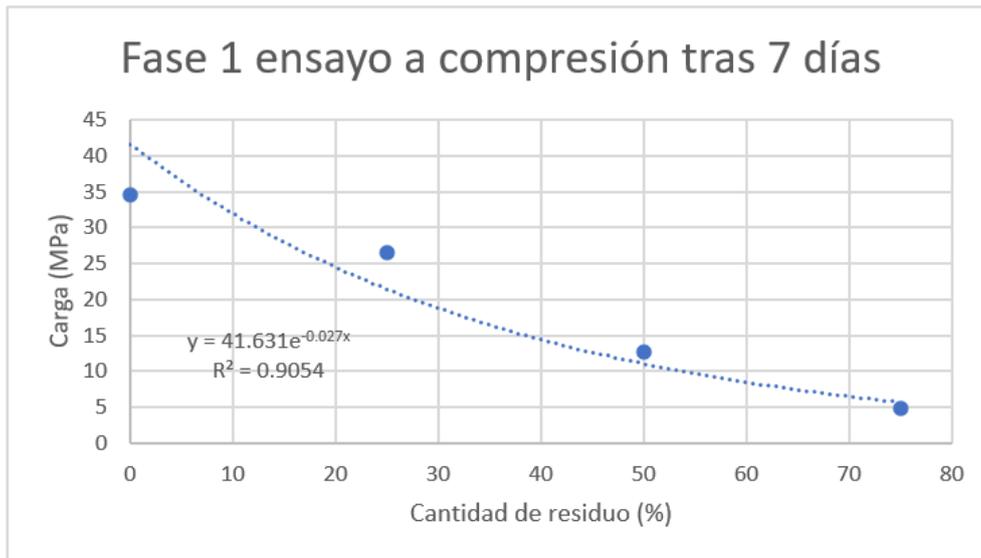


Figura 56. Resultados fase 1 a compresión 7 días.

Tras los 28 días de curado estos son los resultados obtenidos, Tabla 17.

Tabla 17. Resultados fase 1 a compresión 28 días.

28 días % Residuo	Compresión	
	kN	MPa
ME 0%	69,89	43,67
ME 25%	50,14	31,34
ME 50%	38,01	23,75
ME 75%	9,32	5,83

En la Figura 57 se muestran los resultados gráficamente, siguiendo una tendencia muy similar a lo que sucede para edades de ensayo de 7 días, se observa una pérdida de resistencia conforme aumenta el grado de reemplazo.

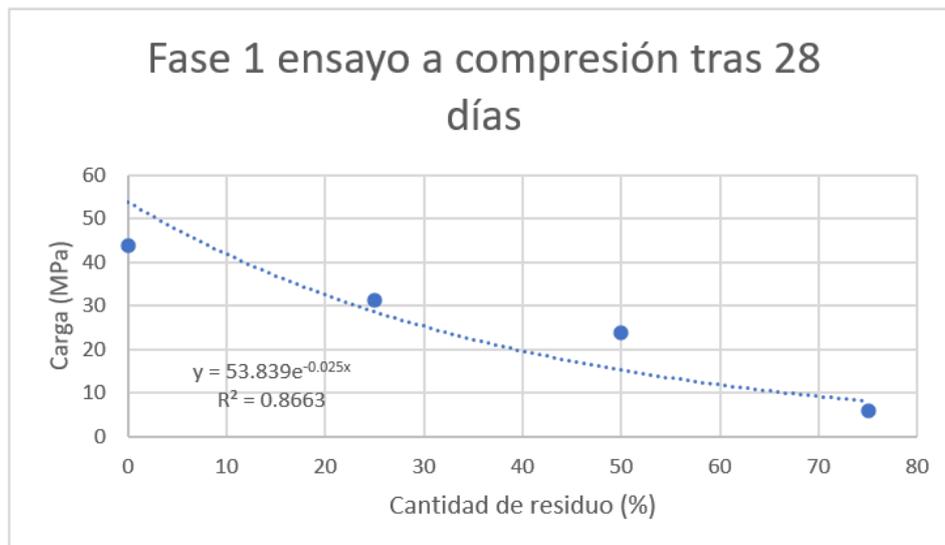


Figura 57. Resultados fase 1 a flexión 28 días.

A la hora de realizar los ensayos a flexión tras 28 días con las probetas de 75% de residuo hubo un problema a causa de que eran muy arcillosas y se fracturaron, es por ello por lo que no hay resultados para los ensayos a flexión tras 28 días. A pesar de ello, no es de gran relevancia ya que los resultados que se hubiesen obtenido serían de un valor realmente bajo.



*Figura 58. Resultados de los morteros tras los ensayos en la fase 1.*

Para analizar los resultados obtenidos, hay que partir del valor obtenido mediante los ensayos de flexión y compresión para las probetas sin residuo, es decir, probetas de cemento Portland, estos valores serán considerados como los ideales y a medida que los resultados sean inferiores a ellos se les categorizará como peores, Figura 58.

De forma visual se realizan dos gráficas con sus respectivas curvas de tendencia gracias a las cuales se puede apreciar la calidad de los resultados de forma más visual.

Finalmente, en estas gráficas se aprecia de forma clara con qué porcentajes de residuo se podría llegar a obtener un hormigón reciclado con unas cualidades mecánicas aceptables, para las probetas con un 25% de residuo el mortero tendrá un 28% menos de resistencia mecánica a la compresión y un 17% a la flexión.

## **5.2 FASE 2: MORTEROS CONVENCIONALES MODIFICADOS**

Es por los resultados obtenidos en la fase 1 tanto, a flexión como a compresión por lo que se realiza esta segunda fase, para lograr encontrar una relación de cemento-residuo con unas propiedades mecánicas aceptables. Las relaciones son de 5%, 10%, 15% y 20% de residuo, de las cuales se obtienen los siguientes resultados afección a compresión, pero los resultados gráficamente se encuentran añadidos en las gráficas presentadas en la fase 1.

### **5.2.1 RESISTENCIA A FLEXIÓN**

Los resultados obtenidos tras 7 días de curado son los siguientes, Tabla 18.

Tabla 18. Resultados fase 2 a flexión 7 días.

7 días	Flexión	
% Residuo	kN	MPa
ME 0%	3,92	9,19
ME 5%	2,57	7,23
ME 10%	2,02	5,68
ME 15%	1,97	5,54
ME 20%	1,70	4,78

En la Figura 59 se muestran los resultados gráficamente. Se observa como la resistencia a flexión se reduce linealmente con el aumento del reemplazo de residuo por cemento Portland, evidenciando una mayor puzolanicidad del cemento que del propio residuo.

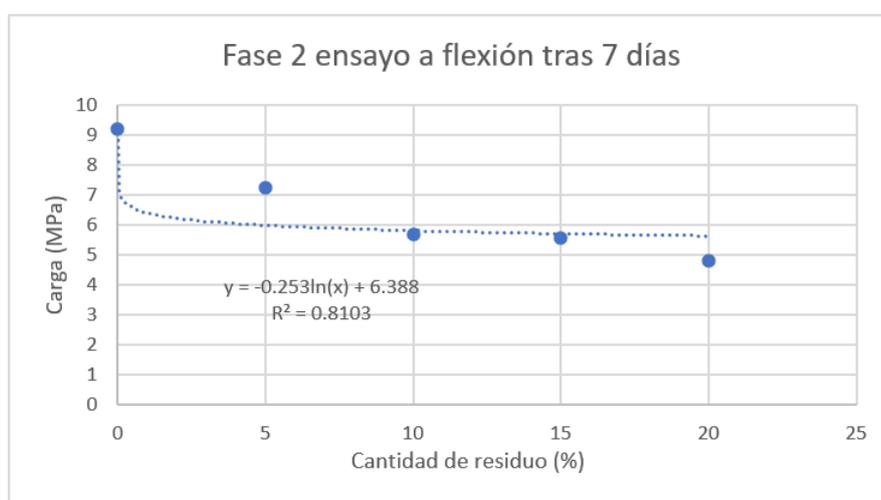


Figura 59. Resultados fase 2 a flexión 7 días.

Tras los 28 días de curado estos son los resultados, Tabla 19.

Tabla 19. Resultados fase 2 a flexión 28 días.

28 días	Flexión	
% Residuo	kN	MPa
ME 0%	4,51	10,57
ME 5%	2,01	5,65
ME 10%	1,68	4,72
ME 15%	1,80	5,07
ME 20%	1,48	4,15

En la Figura 60 se muestran los resultados gráficamente. Se puede observar cómo apenas hay variación con respecto a los resultados obtenidos a los 7 días.

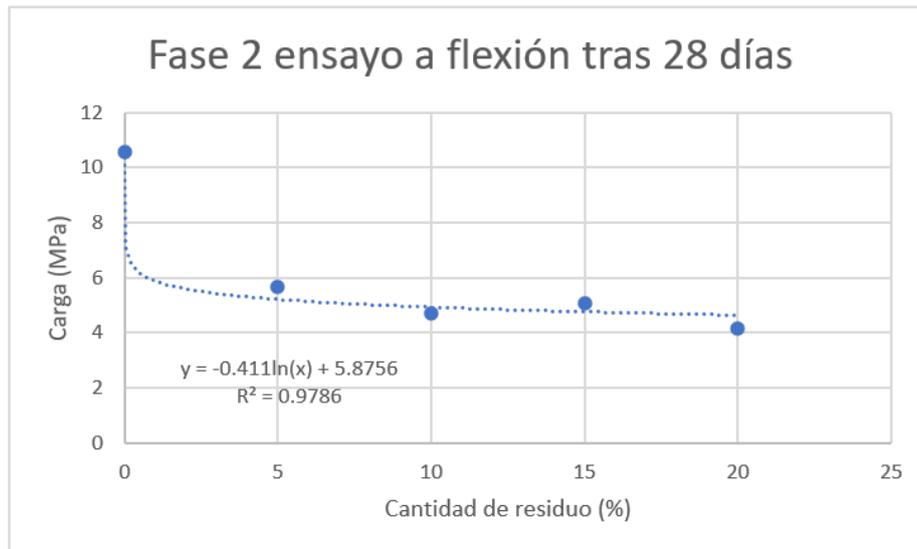


Figura 60. Resultados fase 2 a flexión 28 días.

## 5.2.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Los resultados obtenidos tras 7 días de curado son los siguientes, Tabla 20..

Tabla 20. Resultados fase 2 a compresión 7 días.

7 días % Residuo	Compresión	
	kN	MPa
ME 0%	55,20	34,50
ME 5%	30,23	22,67
ME 10%	25,63	19,22
ME 15%	25,36	17,05
ME 20%	23,55	17,66

En la Figura 61 se muestran los resultados gráficamente. La resistencia a compresión se reduce con el aumento del reemplazo y este efecto es más notable con el primer reemplazo realizado (5%) y deja de ser tan notable para reemplazos superiores.

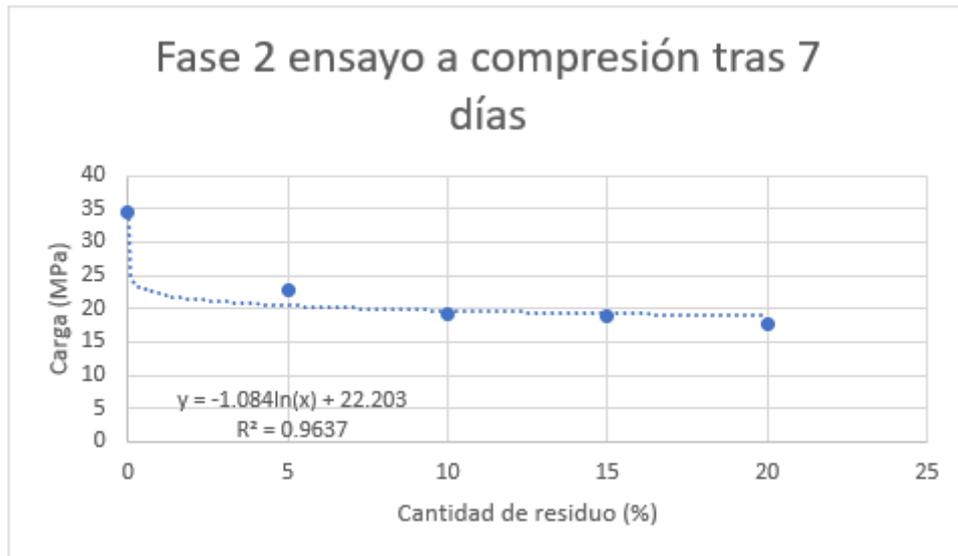


Figura 61. Resultados fase 2 a compresión 7 días.

Tras los 28 días de curado estos son los resultados, Tabla 21.

Tabla 21. Resultados fase 2 a compresión 28 días.

28 días % Residuo	Compresión	
	kN	MPa
ME 0%	69,89	43,67
ME 5%	51,71	38,78
ME 10%	44,34	33,25
ME 15%	39,72	29,79
ME 20%	31,75	23,81

En la Figura 62 se muestran los resultados gráficamente; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Se observa un buen ajuste y esto permite concluir una relación cuasi-lineal entre reemplazo y resistencia a compresión, alcanzándose pérdidas de entorno al 40% para reemplazos del 20%.

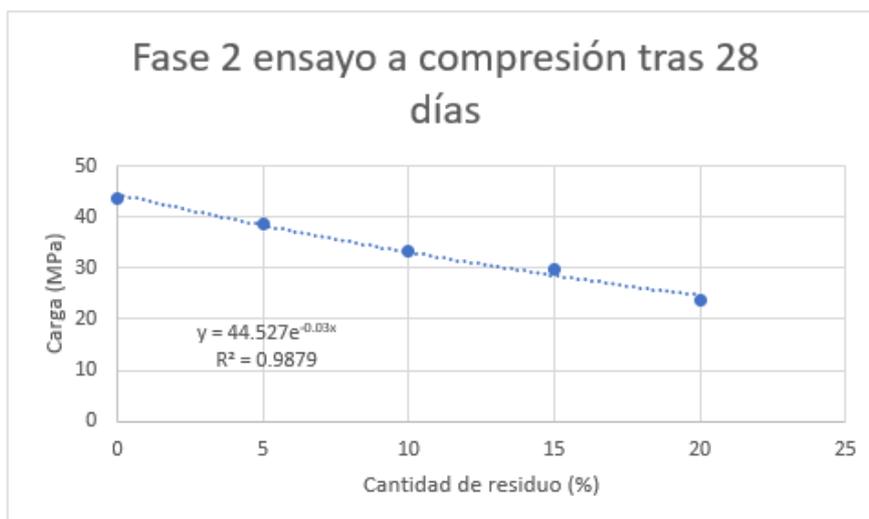


Figura 62. Resultados fase 2 a compresión 28 días.

A la hora de analizar los resultados es importante basarse en la probeta con 0% de residuo, es la referencia de cara al resto de ensayos. Los resultados obtenidos son inferiores a esta probeta como era de esperar, y se observa que la probeta que mejores resultados ha dado es la que posee un 5% de residuo siendo esto un 53% inferior de la carga máxima a compresión que soporta y un 11% inferior de la carga máxima a compresión.

Con lo cual, los mejores resultados obtenidos para morteros en los cuales se sustituye cemento con el residuo los mejores resultados se han obtenido con un 5% de residuo en la probeta, ya que solo disminuye un 11% la carga máxima a compresión que soporta.

### 5.3 FASE 3: MORTEROS AUTONIVELANTES

Es importante tener en cuenta que en la fase 3 con morteros autonivelantes no sólo hay que tener ensayar sus propiedades mecánicas sino también la fluidez del material ya que éste a la hora de aplicarse es necesario que se distribuya de forma uniforme por la superficie a aplicar, Es por ello por lo que se hace la medición de la consistencia en estado fresco mediante la medición torta.

#### 5.3.1 ENSAYOS DE ESCURRIMIENTO

Los resultados de esta fluidez son correctos y denotan que para cualquier porcentaje de filler residuo que posea el material será correcto ya que todas las mediciones de las tortas realizadas con los distintos materiales obtenidos tras las amasadas se encuentran dentro de lo recomendado que es entre 20 y 30 cm de diámetro de la torta. Con lo cual los 4 materiales con los que se han realizado las probetas tienen una fluidez aceptable y son válidos como uso de mortero autonivelante.

En función del porcentaje de filler calizo-residuo utilizado en cada mortero se obtiene una fluidez distinta y como consecuencia un diámetro distinto, es por ello por lo que en la Tabla 22 se obtienen 4 distintas mediciones de las tortas y estas tortas están representadas en la Figura 63 .

Tabla 22. Diámetros de las tortas en el ensayo de escurrimiento.

% Residuo	∅ Tortas (cm)
0%	26,5
25%	30,5
50%	29,8
100%	22,5



Figura 63. Tortas para porcentajes de 25% y 50%.

### 5.3.2 RESISTENCIA A FLEXIÓN

Los resultados obtenidos tras 7 días de curado son los siguientes, Tabla 23.

Tabla 23. Resultados fase 3 a flexión 7 días.

7 días	Flexión	
	kN	MPa
ME 0%	2,09	4,91
ME 25%	2,78	6,51
ME 50%	3,10	7,28
ME 100%	3,02	7,10

En la Figura 64 se muestran los resultados gráficamente. Se puede observar un ajuste excelente del que se deriva el análisis de que la sustitución del filler calizo por residuo reporta una mejora en la resistencia a flexión de los morteros.

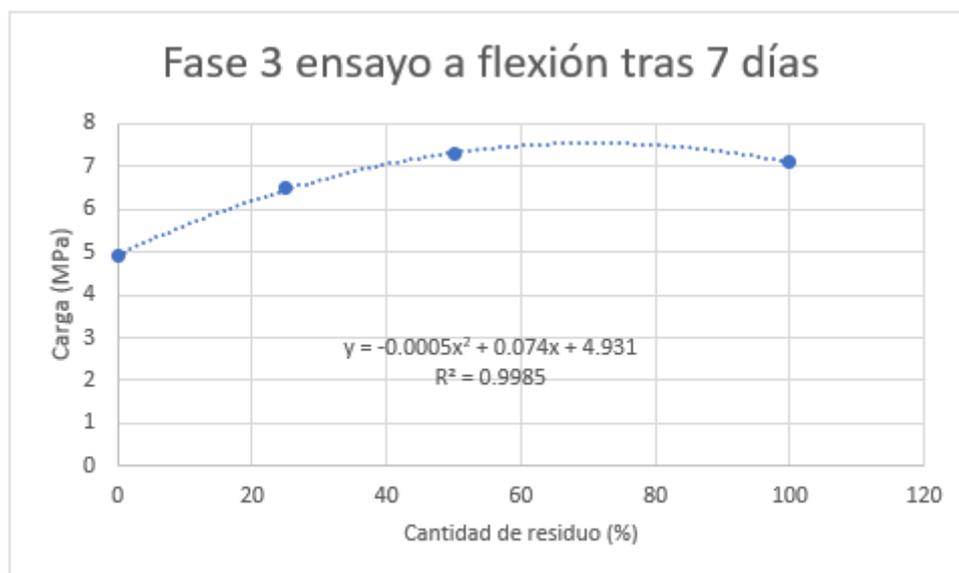


Figura 64. Resultados fase 3 a flexión 7 días.

Tras los 28 días de curado estos son los resultados, Tabla 24.

Tabla 24. Resultados fase 3 a flexión 28 días.

28 días	Flexión	
	kN	MPa
ME 0%	2,58	6,04
ME 25%	3,18	7,46
ME 50%	4,69	10,99
ME 100%	4,95	11,61

En la Figura 65 se muestran los resultados gráficamente. De nuevo, se observa un buen ajuste que demuestra la ganancia de la resistencia a flexión con la sustitución del filler calizo con residuo. Se observa también, que mientras la ganancia del mortero de control ha sido del 15% entre los 7 y 28 días, para el mortero con reemplazo del 100% esta ganancia ha sido de más del 40%.

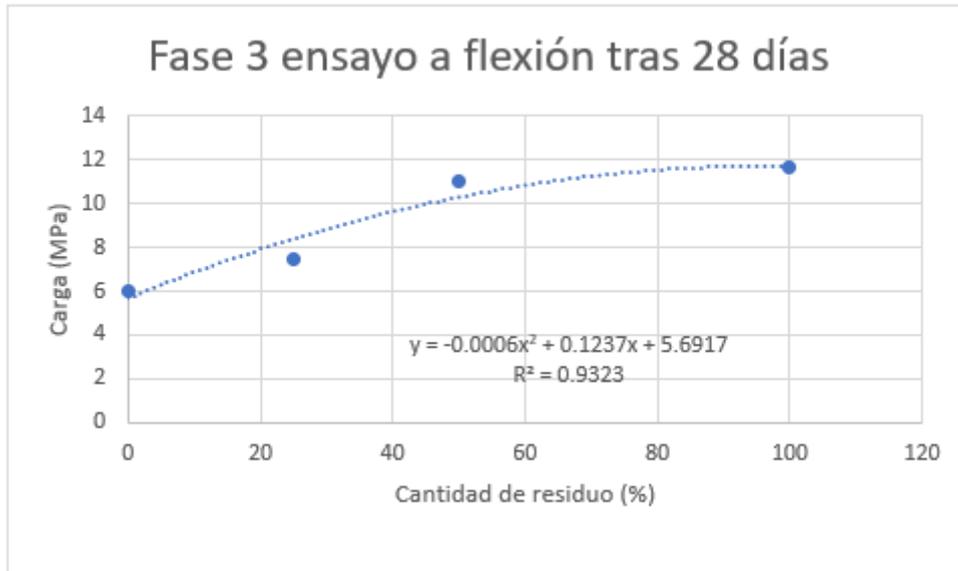


Figura 65. Resultados fase 3 a flexión 28 días.

### 5.3.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Los resultados obtenidos tras 7 días de curado son los siguientes, Tabla 25.

Tabla 25. Resultados fase 3 a compresión 7 días.

7 días	Compresión	
	kN	MPa
ME 0%	28,64	17,90
ME 25%	41,98	26,24
ME 50%	46,41	29,13
ME 100%	47,89	29,93

En la Figura 66 se muestran los resultados gráficamente. El ajuste es muy bueno y similar al obtenido para la resistencia a flexión. Se observa una ganancia en la resistencia conforme aumenta el reemplazo de filler calizo por residuo. Esta ganancia es más acusada para reemplazos más bajos y menos acusada para reemplazos más altos.

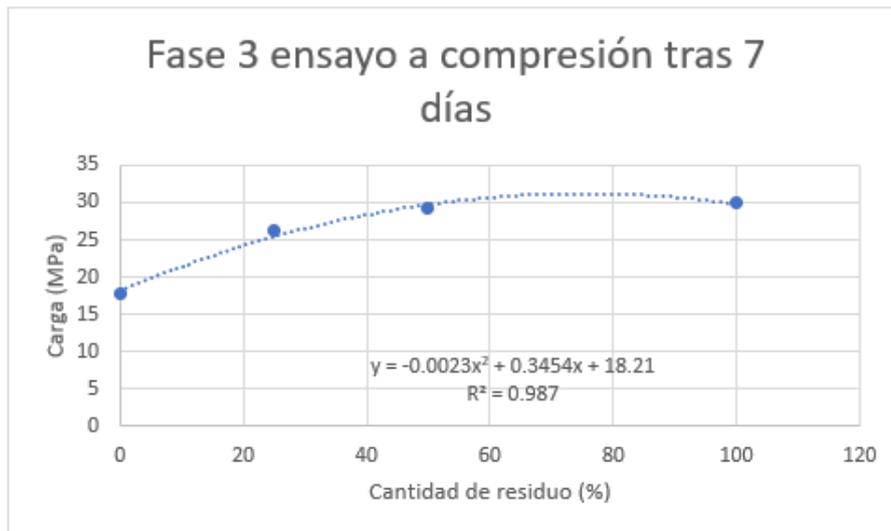


Figura 66. Resultados fase 3 a compresión 7 días.

Tras los 28 días de curado estos son los resultados, Tabla 26.

Tabla 26. Resultados fase 3 a compresión 28 días.

28 días	Compresión	
% Residuo	kN	MPa
ME 0%	34,38	21,49
ME 25%	60,51	37,81
ME 50%	72,82	45,51
ME 100%	76,41	47,75

En la Figura 67 se muestran los resultados gráficamente. Se puede observar una clara ganancia de resistencia a compresión conforme aumenta el reemplazo, elevándose esta ganancia hasta casi el 50% para reemplazos de sustitución del 100%.

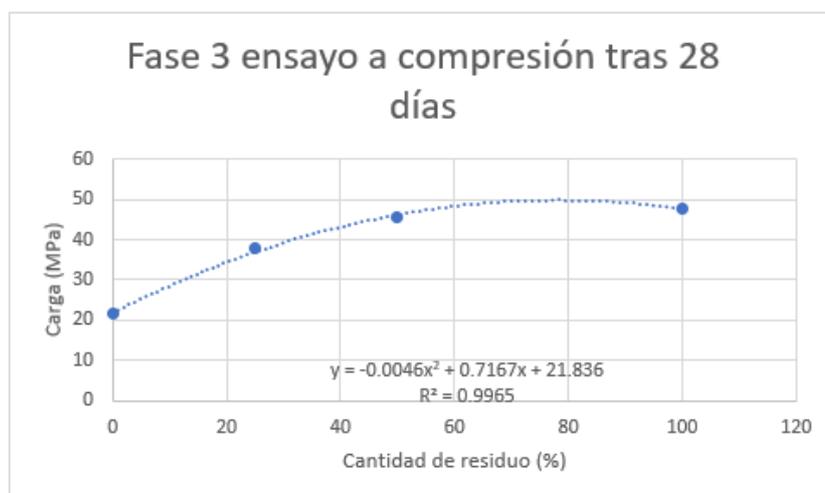


Figura 67. Resultados fase 3 a flexión 28 días.

A la hora de analizar los resultados obtenidos en la fase 3 es en los ensayos mecánicos donde se obtiene lo verdaderamente revelador de esta investigación ya que los resultados mejoran a medida que se añade filler residuo mejor, tanto como para los ensayos de flexión y de compresión, y que además la fluidez del material es buena. Esto da lugar a un mortero autonivelante una calidad superior en cuanto a los ensayos de escurrimiento y mecánicos comparados con los que se obtendrían con la utilización del filler calizo. La mejora con la sustitución total del filler calizo por filler residuo a flexión es de un 193% mientras que la mejora en resistencia a compresión es de un 167% de la carga máxima que soportará antes la rotura, comparándolo con el material con filler calizo.

# 6 CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

## 6 CONCLUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Para comenzar esta importante conclusión es importante recordar que esta investigación está formada por dos distintas fases principales.

Una primera fase que consta de reducir el uso del cemento en la formación de morteros debido a su impacto medioambiental para lograr esto se realizan una serie de probetas con distintos porcentajes de cemento-residuo de 0%, 25%, 50% y 75% obteniendo un material distinto con cada relación. Todas estas probetas han sido ensayadas a flexión y a compresión y comparadas con los resultados referencia obtenidos por el mortero con 0% de residuo.

Una segunda fase, diseñada tras analizar los ensayos sobre las probetas de la fase 1, donde se decide utilizar otras relaciones de cemento-residuo para lograr los resultados más prácticos, usando las siguientes relaciones: 5%, 10%, 15% y 20% de residuo.

Por otro lado, una tercera fase en la cual se han realizado 4 probetas de mortero autonivelante, estas probetas tenían diferencias a la hora de su fabricación ya que se ha ido alterando el porcentaje de filler calizo y filler residuo que poseían dichas probetas, esta relación ha ido marcada por los siguientes porcentajes, una primera probeta con 0% de filler residuo y 100% de filler calizo, la segunda probeta posee 25% de filler residuo y 75% de filler calizo, la tercera probeta está formada por 50% de filler residuo y 50% de filler calizo, y ya por último una probeta realizada íntegramente con filler residuo. De esto se obtienen 4 distintos materiales, primero se realiza un ensayo de escurrido para comprobar su fluidez ya que es muy importante a la hora de su aplicación. Por último, con estas 4 probetas obtenidas se realizan ensayos de flexión y compresión.

Derivados del análisis de los resultados obtenidos, se han obtenido las siguientes conclusiones:

En cuanto al residuo utilizado:

- Al observar la caracterización realizada para el esmalte vítreo se observa que el óxido de silicio es un compuesto con gran porcentaje en él, y que además tiene una serie de componentes inusuales como el boro que abren su aplicación para aplicaciones de blindaje nuclear.

En cuanto a los morteros fabricados con esmalte vítreo:

- A la hora de analizar los resultados obtenidos con los morteros tanto a flexión como a compresión se aprecia que hay una clara pérdida de las propiedades mecánicas del mortero cuanto más se sustituye el cemento por el residuo, esto es a causa de que el residuo, a priori no posee las propiedades puzolánicas que posee el cemento de Portland. La sustitución del residuo por cemento Portland, sólo es recomendada para reemplazos bajos.

En cuanto a los morteros autonivelantes fabricados con esmalte vítreo:

- Los ensayos con los morteros autonivelantes se observa un buen resultado de cara a la fluidez del material ya que los resultados se encuentran dentro de los márgenes recomendados.
- Los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos denotan que a medida que se aumenta el filler residuo y se rebaja el filler calizo, es decir, se aumenta el uso de esmalte vítreo en dichos morteros, las propiedades mecánicas tanto a flexión como a compresión mejoran de forma notable. Esto es debido a que el residuo posee una mayor puzolanicidad que el filler calizo, denotándose su potencial como filler.

Finalizando esta investigación, se puede decir con certeza que el residuo de esmalte vítreo es un material válido para reducir el uso de los materiales tradicionales utilizados para la fabricación de morteros, logrando resultados aceptables con reemplazos pequeños de cemento por esmalte vítreo, y en cuanto a los morteros autonivelantes se obtienen unos resultados realmente buenos mejorando de forma notable las propiedades mecánicas y dando lugar a un material formado por residuo con una gran aplicabilidad.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

## 7 BIBLIOGRAFÍA

1. Villar Cagiao J, Meijide Gómez B, Quesada Doménech JLD, Mainar Gutiérrez S, Lanza Gutiérrez H, Abella Martínez F, et al. HUELLA ECOLÓGICA DEL CEMENTO. Universidad de Coruña; 2010.
2. Grupo Interministerial. Estrategia Española de Desarrollo Sostenible [Internet]. España; 2007. Available from: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-espanola-desarrollo-sostenible/>
3. León-Velez A, Guillén-Mena V. Energía contenida y emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. Rev da Assoc Nac Tecnol do Ambient Construído. 2020;
4. José Luis Herranz Manzanares. ESMALTE SOBRE METAL: UN NUEVO ENFOQUE HACIA LA CREACIÓN PLÁSTICA A TRAVÉS DE LA OBRA DE FRANCES VILASÍS CAPALLEJA. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID; 2002.
5. Qproscolumbia. Esmaltes vitrificables para recubrimiento de metales [Internet]. QPros. 2020. Available from: <https://qpros.co/esmaltes-vitrificables-para-recubrimiento-de-metales/>
6. L. Vielhaber. Tecnología de los esmaltes. Editorial Reverte; 1961.
7. Dr Fritz Ullman. Enciclopedia química industrial. Gustavo Gili, editor. 1931.
8. Gómez EG. Esmaltes y esmaltados. Libro de capacitación técnica de esmaltería en Gursa; 1988.
9. Eugenio Gómez Gómez. El esmalte y su proceso de molienda. 1994.
10. IBORRA BOSCH P. HORMIGÓN DE BAJO IMPACTO AMBIENTAL ELABORADO CON MATERIALES ACTIVADOS ALCALINAMENTE PARA SU USO EN FIRMES COMPACTADOS CON RODILLO. Universidad Politecnica de Valencia; 2011.
11. Pellini Claudio. PROCESO DE FABRICACION DEL CEMENTO PORTLAND CLINKER: PROPIEDADES [Internet]. Historia y biografías. 2021. Available from: <https://historiaybiografias.com/cemento/>
12. UPV. Proceso de fabricación del Hormigon [Internet]. Barcelona; 2021. Available from:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-8.pdf>

13. Torres Carrasco. Reutilización de residuos vitreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos, activación, comportamiento y durabilidad. 2015.
14. Josefa Fernandez. La Industria Química en Cantabria. 2021.
15. Ruth Garcia Calle. Utilización de residuos vitreos en la preparación de pastas y morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente. Comportamiento Reológico y Mecánico. 2016.
16. Jose Calleja. Adiciones y cementos con adiciones.
17. Concretonline. Requisitos de los morteros [Internet]. [cited 2021 Jun 1]. Available from: <https://www.concretonline.com/morteros-revoques/requisitos-de-los-morteros>