



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2016/17

*ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE
CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE
HORMIGONES QUE INCORPORAN RECICLADO
DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA*

Máster en Ingeniería Industrial

ALUMNO

DAVID QUELLE PÉREZ

TUTORES

ALFREDO DEL CAÑO GOCHI
MARÍA PILAR DE LA CRUZ LÓPEZ

FECHA

JUNIO 2017

TITULO Y RESUMEN

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE HORMIGONES QUE INCORPORAN RECICLADO DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA

Este trabajo experimental se base en el estudio sobre la incorporación de residuos de la industria como sustituto parcial del árido convencional para su uso en estructura de hormigón en masa y armado.

Se realizaron análisis granulométricos y ensayos de absorción de agua de los distintos materiales de sustitución para determinar dosificaciones de hormigones que incorporen residuos de la industria y realizar ensayos de resistencia de probetas curadas en agua, con sustitución parcial del árido para poderlas comparar con el hormigón convencional de referencia sin sustitución de árido.

Una vez elegidos los materiales que podían usarse para la sustitución de parte del árido del hormigón se realizaron nuevas amasadas, en las que se ensayaron probetas cubicas y cilíndricas para estimar la resistencia a corto plazo, realizar la comparación de la resistencia entre ellas y así poder comprobar el coeficiente de relación.

Estos ensayos se utilizaron también para proyectar, calcular y ensayar vigas de hormigón armado con hormigones convencionales y con hormigones que incorporen materiales de sustitución.

Por último, se analizan los resultados haciendo una comparativa entre los hormigones convencionales y los que incorporen materiales de sustitución:

- Con probetas conservadas en agua según la norma, en agua salada y al aire, a 15, 28 días y 8 meses.
- En vigas curadas al aire a 28 días.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en este trabajo la ayuda prestada a las siguientes personas y empresas, sin la cual no hubiera sido posible realizar esta investigación objeto de este trabajo:

A D. Alfredo del Caño Gochi y Dña. M. Pilar de la Cruz por poner a mi disposición todo el material e instalaciones necesarias para realizar el trabajo, así como guiarme y ayudarme durante su realización.

A Dña. Pilar Curras de la EPS de esta Universidad por su ayuda en los aspectos relacionados con el trabajo técnico de laboratorio.

A Dña. MariaRecarey de la ETSI de Caminos de esta Universidad por su ayuda en los aspectos relacionados con el ensayo de granulometría.

A las empresas Sika, Cosmos, Tubacer, Indasa y J.Rilo por las aportaciones de materiales que se han necesitado para este trabajo.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2016/17

*ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE
CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE
HORMIGONES QUE INCORPORAN RECICLADO
DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA*

Máster en Ingeniería Industrial

MEMORIA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.	3
2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.	5
3. ESTADO DEL ARTE.	6
3.1 NORMATIVA.	7
4. DOSIFICACIÓN.	9
4.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.	9
4.1.1 Introducción.	9
4.1.2 Normativa.	9
4.1.3 Infraestructuras, instalaciones y equipos.	9
4.1.4 Metodología.	11
4.1.5 Proceso de cálculo del modulo granulométrico.	14
4.1.6 Resultados.	16
4.2. INCORPORACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES.	30
4.3 DOSIFICACIÓN UTILIZADA.	31
4.3.1 Introducción.	31
4.3.2 Normativa.	31
4.3.3 Metodología.	32
4.3.4 Proceso de cálculo de dosificación.	38
4.3.5 Resultados.	40
4.4 ENSAYOS DE ABSORCIÓN DE AGUA.	42
4.4.1 Introducción.	42
4.4.2 Infraestructuras, instalaciones y equipos.	43
4.4.3 Metodología.	43
4.4.4 Proceso de cálculo de absorción de agua.	45
4.4.5 Resultados.	47
5. CÁLCULO DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO.	49
5.1 CÁLCULO DE ESFUERZOS Y DIAGRAMAS.	49
5.2 DIMENSIONADO DE ARMADURAS LONGITUDINALES.	50
5.3 DIMENSIONADO DE ARMADURAS TRANSVERSALES.	52
5.3.1 Agotamiento de la sección por compresión oblicua del alma.	52
5.3.2 Agotamiento de la sección por tracción soportada por hormigón y acero.	53
6. PROCESO EXPERIMENTAL.	57
6.1 INTRODUCCIÓN.	57
6.2 AMASADO Y PREPARACIÓN DE VIGAS Y PROBETAS.	57
6.2.1 Introducción.	57

6.2.2 Normativa.....	58
6.2.3 Infraestructuras, materiales y equipos.....	58
6.2.4 Proceso experimental.....	61
6.3 ENSAYOS DE PROBETAS A COMPRESIÓN.....	71
6.3.1 Introducción.....	71
6.3.2 Probetas curadas en depósito.....	72
6.3.3 Probetas conservadas al aire durante 8 meses.....	76
6.3.4 Probetas conservadas en agua salada durante 8 meses.....	80
6.4 ENSAYOS DE VIGAS.....	83
6.4.1 Introducción.....	83
6.4.2 Vigas conservadas al aire.....	84
7. RESULTADOS.....	89
7.1 RESULTADOS DE ENSAYOS DE PROBETAS A COMPRESIÓN.....	89
7.1.1 Probetas con 15 días de curado.....	89
7.1.2 Probetas con 28 días de curado.....	90
7.1.3 Resumen de los resultados obtenidos.....	93
7.1.4 Probetas conservadas al aire durante 8 meses.....	99
7.1.5 Probetas conservadas en agua salada durante 8 meses.....	100
7.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CON VIGAS.....	102
7.2.1. Introducción.....	102
7.2.2 Resultados de las vigas.....	105
8. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.....	109
8.1 CONCLUSIONES SOBRE LA ABSORCIÓN DE AGUA.....	109
8.2 CONCLUSIONES SOBRE LAS PROBETAS.....	109
8.3 CONCLUSIONES SOBRE LAS VIGAS.....	113
9. FUTUROS DESARROLLOS.....	115
10. REFERENCIAS.....	116

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la historia de la construcción. Es el material resultante de la mezcla de cemento u otro conglomerante con áridos (grava, gravilla y arena) y agua. Existen hormigones que se producen con otros conglomerantes que no son cemento, como el hormigón asfáltico que utiliza betún para realizar la mezcla.

El cemento, mezclado con agua, se convierte en una pasta moldeable con propiedades adherentes, que en pocas horas fragua y se endurece tornándose en un material de consistencia pétreo.

Los egipcios fueron los precursores de este tipo de materiales, usaban una mezcla de yesos y cales como material aglutinante, y más adelante, los romanos hicieron construcciones empleando un compuesto que sería el primer hormigón de la historia, compuesto por caliza calcinada, agua, arena y piedras trituradas. Poca evolución tuvo el hormigón hasta la aparición del cemento Portland hacia el siglo XIX, el cual mejoraba notablemente las cualidades del hormigón, creando una nueva era en materiales de construcción.

La principal característica estructural del hormigón es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante, etc.), por este motivo es habitual usarlo asociado al acero.

Este material se usa principalmente en la edificación e ingeniería civil, aunque cada vez más se está extendiendo su uso a otras aplicaciones debido a la aparición de nuevos aditivos que le confieren propiedades especiales al mismo.

El hormigón tiene diversas propiedades, una de ellas es la alta resistencia a compresión que soporta. En contra, este material ofrece poca resistencia a tracción siendo en algunos casos necesario el empleo de barras de acero para mejorar dicha propiedad. Es casi el único material que llega en bruto a obra, esta característica hace que sea muy útil en construcción ya que puede moldearse de muchas formas.

Existen diferentes tipologías de hormigón (ordinario, en masa, armado, pretensado, aireado...), surgidas a partir de las exigencias en las diferentes aplicaciones; proyectado, estructural, impreso, para pavimentos, de limpieza o nivelación.

A todas estas ventajas, 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 la industria de la construcción.

En los últimos años los problemas ambientales están interesando a diversas áreas de la ciencia y en el uso de hormigón en construcciones el concepto de construcciones sostenibles a tomado una gran importancia.

La sostenibilidad es un concepto global que requiere que se satisfagan una serie de criterios medioambientales económicos y sociales. La contribución a la sostenibilidad de las estructuras de hormigón depende del cumplimiento de criterios como el uso racional de la energía empleada (tanto para la elaboración de los productos de construcción, como para el desarrollo de la ejecución), el empleo de recursos renovables, el empleo de productos reciclados y la minimización de los impactos sobre la naturaleza.

Esto ha llevado a buscar métodos a través de los cuales poder disminuir el impacto que el hombre, en su evolución, ha provocado sobre el ambiente. El área de la construcción, dentro de las distintas alternativas, está estudiando el uso de áridos reciclados provenientes de la demolición de obras civiles para reutilizarlos en la fabricación de nuevo hormigón, así como materiales provenientes de los desechos industriales que se generan diariamente. Esto permitiría disminuir el consumo de fuentes no renovables, obtenidas de actividades extractivas y, al mismo tiempo, reducir la cantidad de escombros de demolición que termina en los vertederos.

Por ello este Trabajo Fin de Máster (TFM) se centra en el uso de materiales provenientes de desechos industriales, así como materiales reciclados de la construcción como sustitutivos parciales de áridos convencionales. En el caso de los materiales provenientes de desechos industriales se van a utilizar materiales que provienen de la industria metálica.

El uso de áridos reciclados utilizados en cantidades relativamente bajas, no modifica considerablemente las propiedades del hormigón, y actualmente, diversas normativas técnicas europeas autorizan el uso de hasta un 20% de áridos reciclados en la producción de hormigón estructural sin ningún tipo de cálculo o justificación. Para este trabajo se ha utilizado este porcentaje de sustitución, siendo este el mayor que se puede utilizar sin realizar ningún otro estudio

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO.

Los objetivos de este trabajo son:

- Determinar dosificaciones para preparar hormigones que incorporen residuos industriales, en concreto, hormigón reciclado, loza, cerámica, granalla, escoria de soldadura y viruta de acero, como sustituto parcial del árido convencional para su uso en estructura de hormigón en masa y armado.
- Realizar probetas cúbicas y cilíndricas, con la dosificación estudiada con y sin sustitución de árido (Seria A).
- Realizar ensayos resistentes de probetas curadas en agua, con y sin sustitución parcial del árido para estimar la resistencia a corto plazo y realizar la comparación de la resistencia entre las probetas cúbicas y cilíndricas.
- Una vez visto los resultados de los hormigones con sustitución, se estudian los mejores y se establece una dosificación definitiva.
- En función de las dosificaciones definitivas se proyecta, calcula y ensaya vigas de hormigón armado con hormigones convencionales y con hormigones que incorporen materiales de sustitución, así como probetas nuevamente que son las denominadas como (Serie B).
- Realizar un análisis comparativo entre los hormigones convencionales y los que incorporen materiales de sustitución a corto plazo (28 días) curadas según la norma en agua y al aire y a largo plazo (8 meses) en agua salada y al aire.

En los ensayos se analizarán probetas y vigas con todos estos hormigones con sustitución y con un hormigón sin sustitución de características similares que denominaremos “blanco” y nos servirá para hacer comparaciones y emitir los resultados obtenidos.

Se detalla en el Anexo 1 “Planificación de los ensayos”, todo el trabajo realizado en el laboratorio de la EPS de Ferrol por el alumno.

3. ESTADO DEL ARTE.

En el campo de los hormigones distintos autores han realizado estudios sobre la sustitución de áridos por distintos tipos residuos industriales, reemplazando así parte de algunos componentes del hormigón para el posterior estudio de sus características. Algunos de estos estudios son los siguientes:

- Plaza Gámez, B. (2014). Estudio de la posibilidad de sustitución de hormigones tradicionales por hormigones ecológicos fabricados con conglomerados procedentes de residuos industriales y áridos reciclados. El estudio determinó que si los desechos de construcción y demolición se gestionaran adecuadamente se podrían utilizar para la elaboración de hormigones ecológicos, y desde el punto de vista económico se reduce el coste de elaboración gracias a la sustitución parcial del cemento.
- Sánchez Rodríguez, Albert (2011). Realizo un estudio sobre el análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones. Se concluye que todos los hormigones analizados cumplen las especificaciones para poder ser utilizados como hormigón no estructural, y que no es necesario el empleo de cementos CEM I 52,5 R y CEM I 42,5 N-SR, los cuales encarecen el precio del hormigón.
- O.R.Batic, J.D. Sota, D.D.Falcone (2006). Estudio sobre la influencia de la incorporación de escoria en las características de los hormigones resultantes. Se observa en los resultados de algunas experiencias mostradas, los reemplazos de diferentes porcentajes, conducen a respuestas diferentes; por lo que si se desean resultados homogéneos en obra es necesario limitar los ámbitos de variación.
- C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco. Hormigón estructural reciclado de hormigón con residuos prefabricados. El uso de agregados reciclados presenta dos beneficios principales. Habría un ahorro económico y ambiental porque por un lado no necesitaría depositar residuos en vertederos, y por otro lado se ahorraría agregado natural.
- Rui Vasco Silva, Jorge de Brito, Ravindra Kumar Dhir (2015). Estudio para establecer una relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión del hormigón con agregado de hormigón reciclado. Relacionado con el efecto de la incorporación de áridos reciclados procedentes de la construcción. Establecieron una relación entre el módulo de elasticidad y

la resistencia a la compresión del hormigón con agregado de reciclado, y facilitar la opción de los diseñadores estructurales para este tipo de hormigón.

- Ana de Guzmán Báez (2010). Estudio de las propiedades fundamentales de elementos prefabricados de hormigón no estructurales, con incorporación de árido reciclado en su fracción gruesa y fina. Los resultados muestran que hasta un 30% de sustitución de árido grueso natural por hormigón reciclado, tiene efectos menores sobre la resistencia a compresión de las probetas, pero que este valor disminuye a mayores niveles de reemplazo. En base a esta dosificación con el 30% de sustitución de árido grueso, se han realizado dos nuevas dosificaciones incorporando 5% y 10% de árido fino reciclado que también se han investigado.

Como resumen de lo que se acaba de indicar y del resto de consultas bibliográficas realizadas, existen una gran documentación sobre sustitutos procedentes del hormigón reciclado, siendo menor los estudios para el resto de materiales de sustitución que vamos a utilizar en este trabajo.

En este trabajo estudiaremos la posibilidad de hacer hormigón con distintos materiales que son residuos industriales, con el fin de conocer si estos hormigones se pudieran utilizar como sumidero y así disminuir el vertido de estos residuos industriales a vertederos.

3.1 NORMATIVA.

La normativa aplicada en los trabajos realizados en el marco de este trabajo es la siguiente:

Ministerio de Fomento, 2008a. Instrucción para la recepción de cementos RC-08. Ministerio de Fomento.

Ministerio de Fomento, 2008b. Instrucción de hormigón estructural EHE-08. Ministerio de Fomento.

UNE-EN 197-1, "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes". Diciembre 2011: MADRID: AENOR

UNE EN 933-1, "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas Método del tamizado". Julio 2012. MADRID: AENOR

UNE EN 933-2, “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas”. Febrero 1999. MADRID: AENOR

UNE EN 932-5, “Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 5: Equipo común y calibración”. Septiembre 2012. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-1, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes”. Agosto 2013. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-2, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia”. Noviembre 2009. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-2/AC, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia”. Julio 2015. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-3, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”. Septiembre 2011. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-3/AC, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”. Diciembre 2011. MADRID AENOR

UNE-EN 12390-4, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo”. Enero 2001. MADRID: AENOR

UNE-EN 12350-1, “Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras”. Noviembre 2009. MADRID: AENOR

UNE-EN 12350-2, “Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.” Noviembre 2009. MADRID: AENOR

ISO 3310-1, “Specifies the technical requirements and corresponding test methods for test sieves of metal wire cloth”. Agosto 2016. Geneva, Switzerland

ISO 3310-2, “Specifies the technical requirements and corresponding test methods for test sieves of perforated metal plate”. Septiembre 2013. Geneva, Switzerland

No existe ninguna normativa para los ensayos de este trabajo no incluidos en la lista anterior, como es el caso de los ensayos de vigas de hormigón armado sometidas a flexión y cortante.

4. DOSIFICACIÓN.

4.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

4.1.1 Introducción.

Para realizar el presente trabajo es necesario establecer una dosificación adecuada para obtener un hormigón de buena calidad, que será la base del estudio a realizar. A su vez, para poder establecer la dosificación del hormigón es necesario conocer la composición granulométrica de los áridos que se van a utilizar. En este apartado se describen las actividades y cálculos realizados para determinar la granulometría de los áridos empleados.

4.1.2 Normativa.

La normativa empleada para determinar la granulometría de los áridos ha sido la siguiente:

UNE EN 933-1, “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas Método del tamizado”. Julio 2012. MADRID: AENOR

UNE EN 933-2, “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas”. Febrero 1999. MADRID: AENOR

UNE EN 932-5, “Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 5: Equipo común y calibración”. Septiembre 2012. MADRID: AENOR

ISO 3310-1, “Specifies the technical requirements and corresponding test methods for test sieves of metal wire cloth”. Agosto 2016. Geneva, Switzerland

ISO 3310-2, “Specifies the technical requirements and corresponding test methods for test sieves of perforated metal plate”. Septiembre 2013. Geneva.

4.1.3 Infraestructuras, instalaciones y equipos.

El estudio de granulometría se ha realizado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puerto de la Universidade da Coruña. En esta

escuela el laboratorio de construcción industrial ha puesto a nuestra disposición los equipos necesarios para realizar este estudio, siendo estos los siguientes:

- Tamices de ensayo con aberturas como se especifica en la Norma UNE EN 933-2 y de acuerdo con los requisitos de las Normas ISO 3310-1 e ISO 3310-2.
- Tapa y fondo herméticos para los tamices.
- Estufa ventilada, regulada por un termostato que mantiene una temperatura de 110 ± 5 °C y permite el secado de los áridos sin causar la rotura de partículas, independientemente de su tamaño.
 - Se ha utilizado la estufa Proeti, modelo B0150, que posee las siguientes características esenciales:
 - Cámara interior de acero inoxidable, térmicamente aislada.
 - Puerta de doble pared con cierre hermético, con una ventana de 220 x 230 mm con doble cristal templado.
 - Microprocesador con indicación digital, para el control de la temperatura, desde temperatura ambiente hasta 200 °C.
 - Plataforma giratoria de Ø 250 mm construida en aluminio, que acepta hasta 9 cápsulas de ensayo de Ø 55 x 35 mm, girando a una velocidad comprendida entre 5 y 6 r.p.m.
- Equipo de lavado formado por un grifo de laboratorio, un lavador y una bandeja para evitar la pérdida de material.
- Balanza con una exactitud de $\pm 0.1\%$ de la masa en la porción de ensayo.
 - Se ha utilizado una balanza de precisión de la marca RADWAG, modelo PS 4500.R1, cuyas características esenciales son:
 - Capacidad máxima: 4500 g
 - Carga mínima: 500 mg
 - Lectura mínima: 10 mg
 - Rango de tara: 4500 g
 - Linealidad: ± 20 mg
 - Tiempo de estabilización: 1,5 s
 - Tamaño del plato: 195 x 195 mm
 - Deriva de sensibilidad: 2 ppm / °C en temperatura 10 - 4°C
 - Temperatura de trabajo: +10 - +40 ° C
- Recipientes cerámicos.
- Vibrotamizadora de laboratorio y cabina insonorizada.

- En este caso se ha utilizado una vibrotamizadora de la marca Proeti, modelo A0511, cuyas características son las siguientes:
 - Accionamiento por motor eléctrico.
 - Puede tamizar hasta 8 tamices de Ø 8" ó 200 mm, 250 mm, 12" ó 300 mm y 315 mm más fondo y tapa.
 - Puede realizar ensayos de tamizado por vía húmeda.
 - Todos los equipos cumplen los requisitos generales de la Norma UNE EN 932-5.

4.1.4 Metodología.

Para realizar el estudio granulométrico se han utilizado tres tipos distintos de áridos: arena fina, arena gruesa y grava. Una vez preparado los áridos se han separado 3 muestras de arena fina de 1 kg, 3 muestras de arena gruesa de 1 kg y 3 muestras de grava de 1 kg, pesándolas mediante una balanza de precisión según el procedimiento que se especifica en la normativa correspondiente.



Figura 4.1.4.1. Muestras utilizadas durante el ensayo granulométrico.

MUESTRAS PARA ENSAYO GRANULOMÉTRICO		
ARENA FINA	ARENA GRUESA	GRAVA
G2, T3, T8	R3, B1, W1	T5, T10, T7

Tabla 4.1.4.1. Tabla de muestras para el ensayo granulométrico.

Un vez obtenidas todas las muestras de los áridos, estas se introducen en una estufa ventilada, regulada por un termostato, manteniendo una temperatura de 110 ± 5 °C durante 24 horas, para eliminar toda la humedad que contienen estos áridos.



Figura 4.1.4.2. Estufa ventilada para la eliminación de humedad.

Transcurrido el tiempo necesario se sacan las muestras de la estufa ventilada y se pesan nuevamente para determinar la pérdida de peso debido al secado de la humedad contenida en las muestras. Un dato importante es que las muestras tienen que estar totalmente frías para pesar, debido a que el calor hace que la balanza se descalibre.

Una vez pesadas las muestras se realiza un lavado mediante la utilización de un tamiz de 0,063 milímetros de luz para eliminar los áridos con un tamaño menor a esta medida. Esto es debido a que los áridos menores a esta granulometría no son utilizables para el estudio, por lo que es importante asegurarse de que se eliminen totalmente. Una vez completado este proceso, se vuelven a introducir las muestras en la estufa ventilada a la misma temperatura (110 ± 5 °C), durante otras 24 horas.



Figura 4.1.4.3. Lavado de áridos para la eliminación de áridos finos.

Transcurrido las 24 horas se extraen las muestras de la estufa ventilada y se dejan reposar hasta que alcancen la temperatura ambiente.

Luego se pesan las muestras nuevamente, obteniendo su peso libre de toda humedad.

A continuación se pesan cada uno de los tamices que se van a utilizar en la columna de tamizado, registrando la tara de cada uno de ellos. Se monta la columna de tamices, siguiendo un orden ascendente de tamaño según la abertura de cada tamiz, empezando por los tamices con mayor abertura que se colocaran en la parte superior. Por último se coloca una tapa ciega en la parte inferior de la columna para evitar posibles pérdidas de material. Una vez colocada la columna de tamizado, se vierte la muestra en dicha columna.

A continuación se introduce la columna de tamices en la máquina de tamizar, que ejerce una vibración sobre los tamices, de modo que se propiciará el paso descendente de los áridos por los diversos tamices, hasta alcanzar el tamiz de abertura correspondiente, que impide su paso por tener una luz menor que el tamaño del árido.



Figura 4.1.4.4. Vibrotamizadora utilizada.

Se extraen los tamices de la vibrotamizadora y se pesan individualmente en la balanza, con la cantidad de muestra que ha quedado retenida en cada uno de los tamices. A continuación se desecha la muestra del tamiz que se ha pesado.

De este modo se determina la proporción de áridos de cada tamaño que componen la muestra. Para que la prueba sea válida, no se puede perder más de un 1% de material durante el desarrollo del ensayo.

4.1.5 Proceso de cálculo del modulo granulométrico.

Una vez obtenidos los datos requeridos, se genera una tabla para cada una de las muestras de los áridos, de la forma reflejada en la Tabla 4.1.5.1.

Tamaño Tamiz (mm)	Tara Tamiz (g)	Masa de material retenido		% de material retenido	% acumulado que se queda	% acumulado que pasa
		Tara+Peso (g)	Peso retenido (R _i)			
16	a ₁	b ₁	c ₁	d ₁	e ₁	f ₁
8	a ₂	b ₂	c ₂	d ₂	e ₂	f ₂
4	a ₃	b ₃	c ₃	d ₃	e ₃	f ₃
2	a ₄	b ₄	c ₄	d ₄	e ₄	f ₄

1	a_5	b_5	c_5	d_5	e_5	f_5
0,5	a_6	b_6	c_6	d_6	e_6	f_6
0,25	a_7	b_7	c_7	d_7	e_7	f_7
0,125	a_8	b_8	c_8	d_8	e_8	f_8
0,063	a_9	b_9	c_9	d_9	e_9	f_9
Ciego P	A_{10}	B_{10}	C_{10}	D_{10}	E_{10}	F_{10}

Tabla 4.1.5.1. Tabla de los datos obtenidos en el proceso de tamizado.

Donde:

a_i : es el peso de cada tamiz..

b_i : es el peso de cada tamiz más el de la parte de muestra que queda retenida en el tamiz.

c_i : es el peso de la parte de muestra que queda retenido en cada tamiz. Se obtiene mediante la ecuación (4.1.5.1):

$$c_i = b_i - a_i \quad (4.1.5.1)$$

d_i : es el porcentaje de material retenido por los tamices. Se obtiene mediante la ecuación (4.1.5.2):

$$d_i = \frac{c_i * 100}{M_1} \quad (4.1.5.2)$$

M_1 : es el peso de la muestra después de pasar por la estufa.

e_i : es el porcentaje de material retenido acumulado. Se obtiene mediante la ecuación (4.1.5.3):

$$e_i = e_{i-1} + d_i \quad (4.1.5.3)$$

f_i : es el porcentaje de material que pasa por los tamices. Se obtiene mediante la ecuación (4.1.5.4):

$$f_i = 100 - e_i \quad (4.1.5.4)$$

Los datos obtenidos en el proceso de tamizado se muestran en el Anexo 2 de este trabajo.

Para realizar la curva característica granulométrica del árido se representa f_i en una gráfica en la cual se consignan en abscisas los tamaños de luz del tamiz, y en ordenadas el porcentaje retenido de 0 a 100.

Para cada muestra de árido se calcula la media de los distintos porcentajes de árido retenido acumulado obtenidos anteriormente. Con este nuevo valor se calcula el módulo granulométrico de dicha muestra, según la fórmula (4.1.5.5):

$$\text{Modulo granulometrico} = \frac{\sum_{i=1}^{i=8} \text{Media de \% retenido acumulado}}{100} \quad (4.1.5.5)$$

El módulo granulométrico también se conoce como *módulo de finura* o de *Abrams*, en caso de emplearse la serie de tamices americana. Dicho módulo cuantifica el área limitada por la curva granulométrica, el eje de ordenadas y la horizontal trazada por la altura del 100 por 100.

4.1.6 Resultados.

Los resultados del estudio granulométrico obtenidos en cada una de las 9 muestras de los distintos áridos se muestran en tablas en donde se representa:

M0: es el peso inicial de la muestra.

M0+RECIP: es el peso inicial de la muestra teniendo en cuenta el peso del recipiente.

M1+RECIP: es el peso de la muestra después de pasar por la estufa, teniendo en cuenta el peso del recipiente.

M1: es el peso de la muestra después de pasar por la estufa.

M2: es el peso de la muestra seca tras lavarla y someterla al proceso de secado.

Con estas tablas se calcula:

$$\text{Humedad de la muestra} = \frac{100 \times (M1 - M0)}{M1} \quad (4.1.6.1)$$

$$\text{Perdidas de material} = \frac{(Ri - M2)}{M2} \times 100 \quad (4.1.6.2)$$

Arena Fina

Muestra G2 de arena fina

G2		
PESO RECIPIENTE	625,52	g
M0	1000,16	g
M0+ RECIP	1625,68	g
M1+RECIP	1623,85	g
M1	998,33	g
M2+RECIP	1782,35	g
M2	970,44	g
M1-M2	27,89	g
Humedad muestra	0,183306121	%
Perdidas de material	0,012365525	<1%

Tabla 4.1.6.1. Tabla de pesajes de la muestra G2 de arena fina.

Se puede observar que las pérdidas de material (marcadas en verde), durante el proceso no superan el 1%, lo cual indica que el ensayo es válido, de acuerdo con la norma UNE EN 933-1.

Tras la realización del tamizado se determina el porcentaje de muestra que pasa a través de cada tamiz, y a partir de ello se obtiene la curva granulométrica característica del árido.

Los resultados del tamizado se incluyen en el Anexo 2 de este trabajo.

A continuación se muestra la curva característica granulométrica correspondiente a la muestra G2 de árido fino.

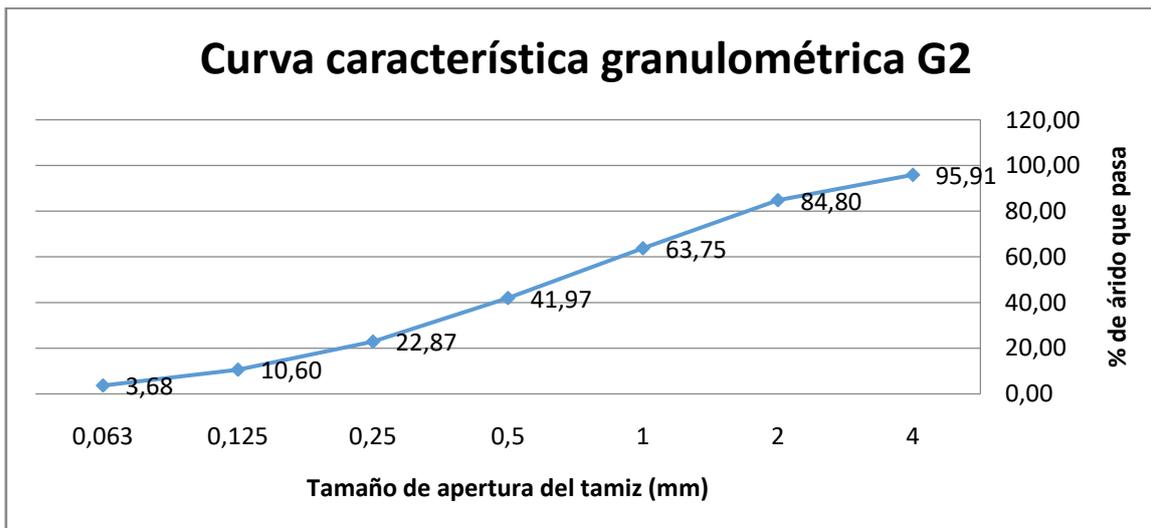


Figura 4.1.6.1. Curva característica granulométrica de la muestra de arena fina G2.

Muestra T3 de arena fina

T3		
PESO RECIPIENTE	810,93	g
M0	1000,27	g
M0+ RECIP	1811,2	g
M1+RECIP	1809,3	g
M1	998,37	g
M2+RECIP	1968,97	g
M2	971,65	g
M1-M2	26,72	g
Humedad muestra	0,190310206	%
Perdidas de material	0,010291772	<1%

Tabla 4.1.6.2. Tabla de pesajes de la muestra T3 de arena fina.

Se puede observar que las pérdidas de material (marcadas en verde), durante el proceso no superan el 1%, lo cual indica que el ensayo es válido, de acuerdo con la norma UNE EN 933-1.

Tras la realización del tamizado se determina el porcentaje de muestra que pasa a través de cada tamiz, y a partir de ello se obtiene la curva granulométrica característica del árido.

Los resultados del tamizado se incluyen en el Anexo 2 de este trabajo.

A continuación se muestra la curva característica granulométrica correspondiente a la muestra T3 de árido fino.

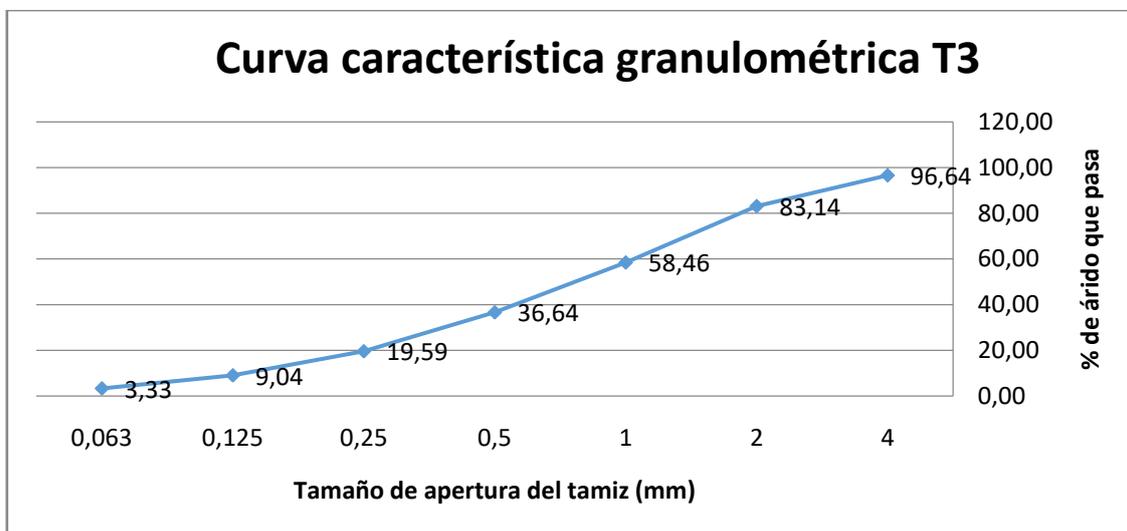


Figura 4.1.6.2. Curva característica granulométrica de la muestra de arena fina T3.

Muestra T8 de arena fina

T8		
PESO RECIPIENTE	877,52	g
M0	1000,53	g
M0+ RECIP	1878,05	g
M1+RECIP	1875,99	g
M1	998,47	g
M2+RECIP	2029,91	g
M2	966	g
M1-M2	32,47	g
Humedad muestra	0,206315663	%
Perdidas de material	0,008281573	<1%

Tabla 4.1.6.3. Tabla de pesajes de la muestra T8 de arena fina.

Se puede observar que las pérdidas de material (marcadas en verde), durante el proceso no superan el 1%, lo cual indica que el ensayo es válido, de acuerdo con la norma UNE EN 933-1.

Tras la realización del tamizado se determina el porcentaje de muestra que pasa a través de cada tamiz, y a partir de ello se obtiene la curva granulométrica característica del árido.

Los resultados del tamizado se incluyen en el Anexo 2 de este trabajo.

A continuación se muestra la curva característica granulométrica correspondiente a la muestra T8 de árido fino.

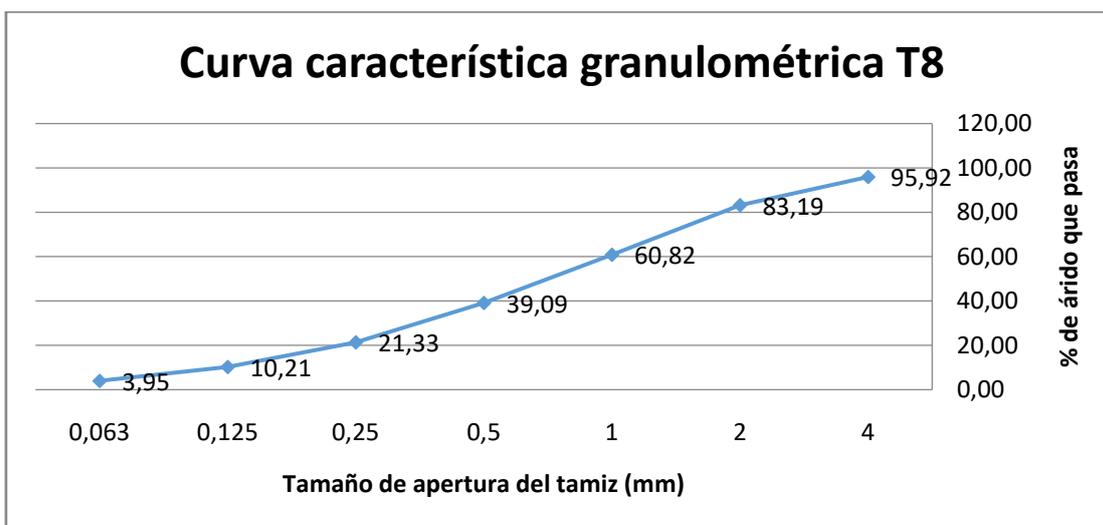


Figura 4.1.6.3. Curva granulométrica de la muestra de arena fina T8.

Una vez obtenido los datos de las tres muestras se proceden a realizar todos los cálculos necesarios. Se calcula la media del material retenido acumulado en los tamices, con los datos reflejados en el Anexo 2 de este trabajo y a partir de esto, el módulo granulométrico del árido según la ecuación (4.1.6.3).

$$\text{Modulo granulométrico} = \frac{\sum_{i=1}^{i=8} \text{Media de \% retenido acumulado}}{100} \quad (4.1.6.3).$$

Los resultados obtenidos en el cálculo de la media para la arena fina son los siguientes:

Apertura Tamiz (mm)	Media de las muestras	
	% Retenido Acumulado	% Que pasa acumulado
16	0,000	100,000
8	0,000	100,000
4	3,845	96,155
2	16,289	83,711
1	38,989	61,011
0,5	60,767	39,233
0,25	78,738	21,262
0,125	90,049	9,951
0,063	96,347	3,653

Tabla 4.1.6.4. Porcentajes de árido fino retenido y árido fino que pasa a través de los tamices.

El módulo granulométrico se calcula según la ecuación (4.1.6.3), tal como se muestra a continuación:

$$\text{Módulo granulométrico} = \frac{\sum_{i=1}^{i=7} \text{Media de \% retenido acumulado}}{100} =$$

$$= \frac{3,845 + 16,289 + 38,989 + 60,767 + 78,738 + 90,049 + 96,347}{100} = 2,886$$

Módulo Granulométrico de la arena fina	2,886
---	--------------

Arena gruesa

Muestra R3 de arena gruesa

R3		
PESO RECIPIENTE	617,23	9
M0	1000,2	9
M0+ RECIP	1617,43	9
M1+RECIP	1612,77	9

M1	995,54	9
M2+RECIP	1575,58	9
M2	958,35	9
M1-M2	37,19	9
Humedad muestra	0,468087671	%
Perdidas de material	0,011478061	<1%

Tabla 4.1.6.5. Tabla de pesajes de la muestra R3 de arena gruesa.

Se puede observar que las pérdidas de material (marcadas en verde), durante el proceso no superan el 1%, lo cual indica que el ensayo es válido, de acuerdo con la norma UNE EN 933-1.

Tras la realización del tamizado se determina el porcentaje de muestra que pasa a través de cada tamiz, y a partir de ello se obtiene la curva granulométrica característica del árido.

Los resultados del tamizado se incluyen en el Anexo 2 de este trabajo.

A continuación se muestra la curva característica granulométrica correspondiente a la muestra R3 de arena gruesa.

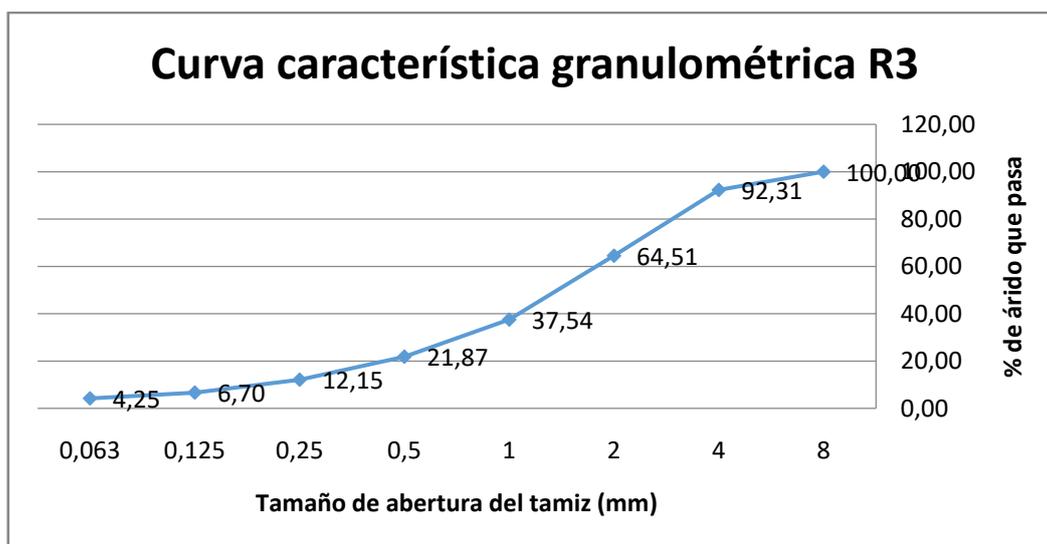


Figura 4.1.6.4. Curva característica granulométrica de la muestra de arena gruesa R3.

Muestra B1 de arena gruesa

B1		
PESO RECIPIENTE	591,81	g
M0	1000,58	g
M0+ RECIP	1592,39	g
M1+RECIP	1587,56	g
M1	995,75	g
M2+RECIP	1544,71	g
M2	952,9	g
M1-M2	42,85	g
Humedad muestra	0,485061511	%
Perdidas de material	0,038828838	<1%

Tabla 4.1.6.6. Tabla de pesajes de la muestra B1 de arena gruesa.

Se puede observar que las pérdidas de material (marcadas en verde), durante el proceso no superan el 1%, lo cual indica que el ensayo es válido, de acuerdo con la norma UNE EN 933-1.

Tras la realización del tamizado se determina el porcentaje de muestra que pasa a través de cada tamiz, y a partir de ello se obtiene la curva granulométrica característica del árido.

Los resultados del tamizado se incluyen en el Anexo 2 de este trabajo.

A continuación se muestra la curva característica granulométrica correspondiente a la muestra B1 de arena gruesa.

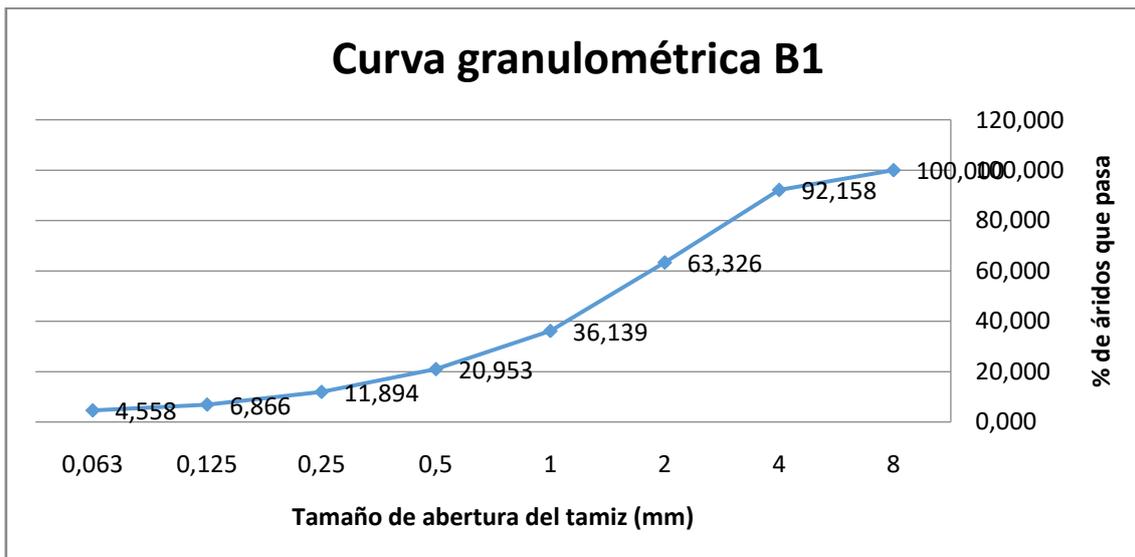


Figura 4.1.6.5. Curva característica granulométrica de la muestra de arena gruesa B1.

Muestra W1 de arena gruesa

W1		
PESO RECIPIENTE	607,15	g
M0	1000,3	g
M0+ RECIP	1607,45	g
M1+RECIP	1602,78	g
M1	995,63	g
M2+RECIP	1563,93	g
M2	956,78	g
M1-M2	38,85	g
Humedad muestra	0,469049747	%
Perdidas de material	0,005225862	<1%

Tabla 4.1.6.7. Tabla de pesajes de la muestra W1 de arena gruesa.

Se puede observar que las pérdidas de material (marcadas en verde), durante el proceso no superan el 1%, lo cual indica que el ensayo es válido, de acuerdo con la norma UNE EN 933-1.

Tras la realización del tamizado se determina el porcentaje de muestra que pasa a través de cada tamiz, y a partir de ello se obtiene la curva granulométrica característica del árido.

Los resultados del tamizado se incluyen en el Anexo 2 de este trabajo.

A continuación se muestra la curva característica granulométrica correspondiente a la muestra W1 de arena gruesa.

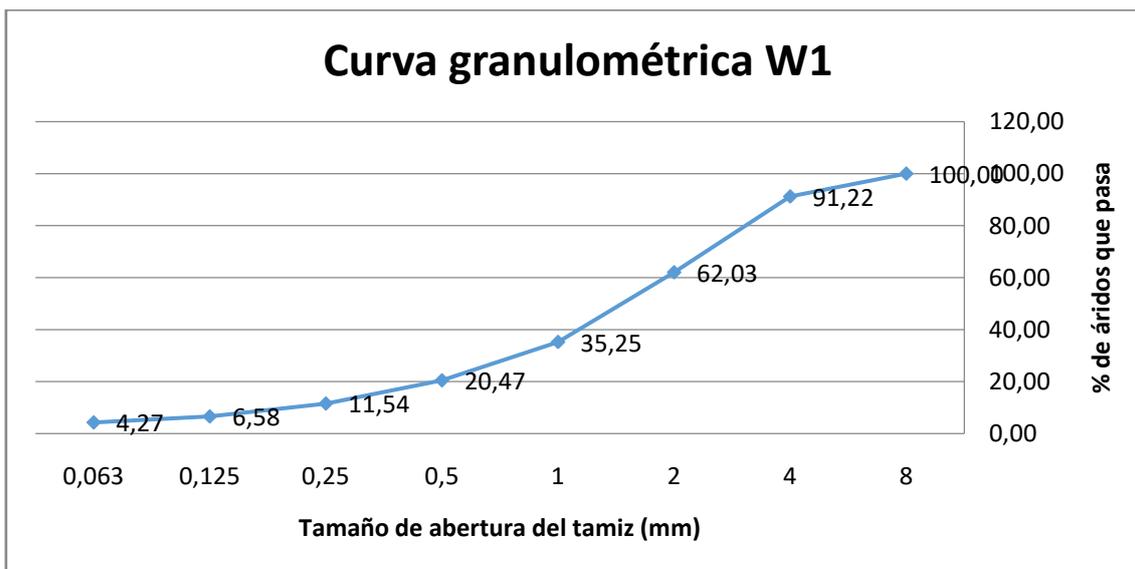


Figura 4.1.6.6. Curva característica granulométrica de la muestra de arena gruesa W1.

Los resultados obtenidos en el cálculo de la media para la arena gruesa son los siguientes:

Arena gruesa	Media de las muestras	
	% Retenido Acumulado	% Que pasa acumulado
16	0,000	100,000
8	0,000	100,000
4	8,337	91,663
2	36,944	63,056
1	63,925	36,075
0,5	79,134	20,866
0,25	88,372	11,628
0,125	93,517	6,483
0,063	95,873	4,127

Tabla 4.1.6.8. Porcentajes de arena gruesa retenida y arena gruesa que pasa a través de los tamices.

El módulo granulométrico de la arena gruesa se calcula según la ecuación (4.1.6.3), tal como se muestra a continuación:

$$\text{Módulo granulométrico} = \frac{\sum_{i=1}^{i=7} \text{Media de \% retenido acumulado}}{100} =$$

$$= \frac{8,337 + 36,944 + 63,925 + 79,134 + 88,372 + 93,517 + 95,873}{100} = 3,702$$

Módulo Granulométrico de la arena gruesa	3,702
---	--------------

Grava

Muestra T5 de grava

T5		
PESO RECIPIENTE	831,56	g
M0	1000,34	g
M0+ RECIP	1831,9	g
M1+RECIP	1829,78	g
M1	998,22	g
M2+RECIP	1824,93	g
M2	993,37	g
M1-M2	4,85	g
Humedad muestra	0,212378033	%
Perdidas de material	0,01409344	<1%

Tabla 4.1.6.9. Tabla de pesajes de la muestra T5 de grava.

Se puede observar que las pérdidas de material (marcadas en verde), durante el proceso no superan el 1%, lo cual indica que el ensayo es válido, de acuerdo con la norma UNE EN 933-1.

Tras la realización del tamizado se determina el porcentaje de muestra que pasa a través de cada tamiz, y a partir de ello se obtiene la curva granulométrica característica del árido.

Los resultados del tamizado se incluyen en el Anexo 2 de este trabajo.

A continuación se muestra la curva característica granulométrica correspondiente a la muestra T5 de grava.

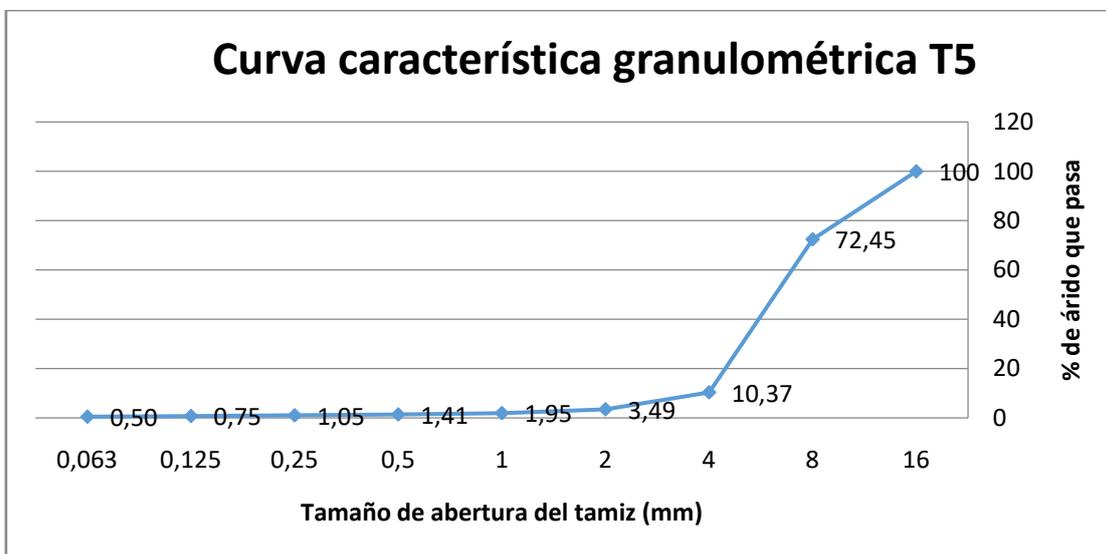


Figura 4.1.6.7. Curva característica granulométrica de la muestra de grava T5.

Muestra T10 de grava

T10		
PESO RECIPIENTE	819,12	9
M0	1000,64	9
M0+ RECIP	1819,76	9
M1+RECIP	1817,86	9
M1	998,74	9
M2+RECIP	1813,12	9
M2	994	9
M1-M2	4,74	9
Humedad muestra	0,190239702	%
Perdidas de material	0,04527163	<1%

Tabla 4.1.6.10. Tabla de pesajes de la muestra T10 de grava.

Se puede observar que las pérdidas de material (marcadas en verde), durante el proceso no superan el 1%, lo cual indica que el ensayo es válido, de acuerdo con la norma UNE EN 933-1.

Tras la realización del tamizado se determina el porcentaje de muestra que pasa a través de cada tamiz, y a partir de ello se obtiene la curva granulométrica característica del árido.

Los resultados del tamizado se incluyen en el Anexo 2 de este trabajo.

A continuación se muestra la curva característica granulométrica correspondiente a la muestra T10 de grava.

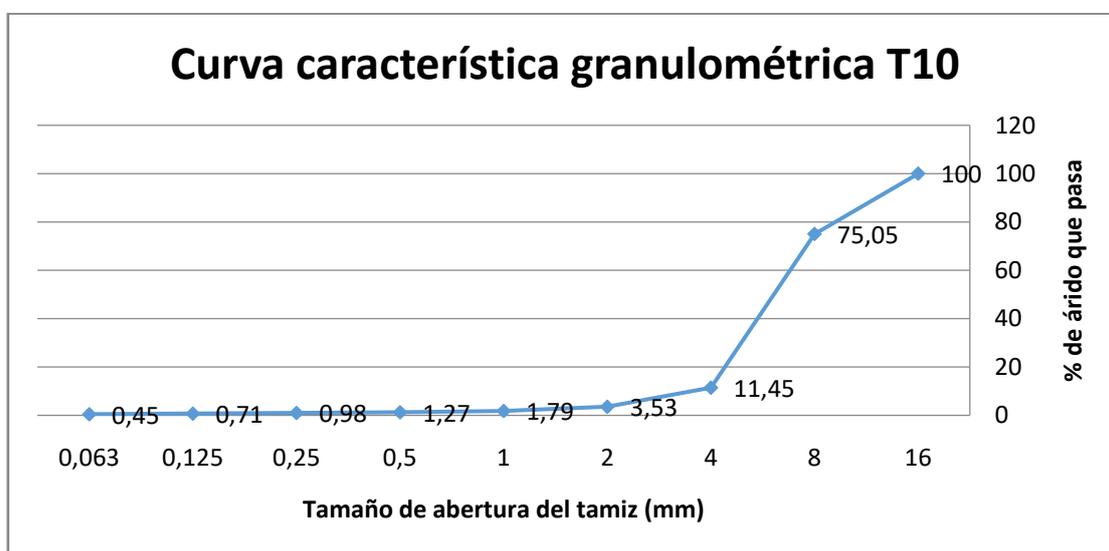


Figura 4.1.6.8. Curva característica granulométrica de la muestra de grava T10.

Muestra T7 de grava

T7		
PESO RECIPIENTE	875,28	9
M0	1000,34	9
M0+ RECIP	1875,62	9
M1+RECIP	1873,31	9
M1	998,03	9
M2+RECIP	1868,07	9
M2	992,79	9

M1-M2	5,24	9
Humedad muestra	0,231455968	%
Perdidas de material	0,022159772	<1%

Tabla 4.1.6.11. Tabla de pesajes de la muestra T7 de grava.

Se puede observar que las pérdidas de material (marcadas en verde), durante el proceso no superan el 1%, lo cual indica que el ensayo es válido, de acuerdo con la norma UNE EN 933-1.

Tras la realización del tamizado se determina el porcentaje de muestra que pasa a través de cada tamiz, y a partir de ello se obtiene la curva granulométrica característica del árido.

Los resultados del tamizado se incluyen en el Anexo 2 de este trabajo.

A continuación se muestra la curva característica granulométrica correspondiente a la muestra T7 de grava.

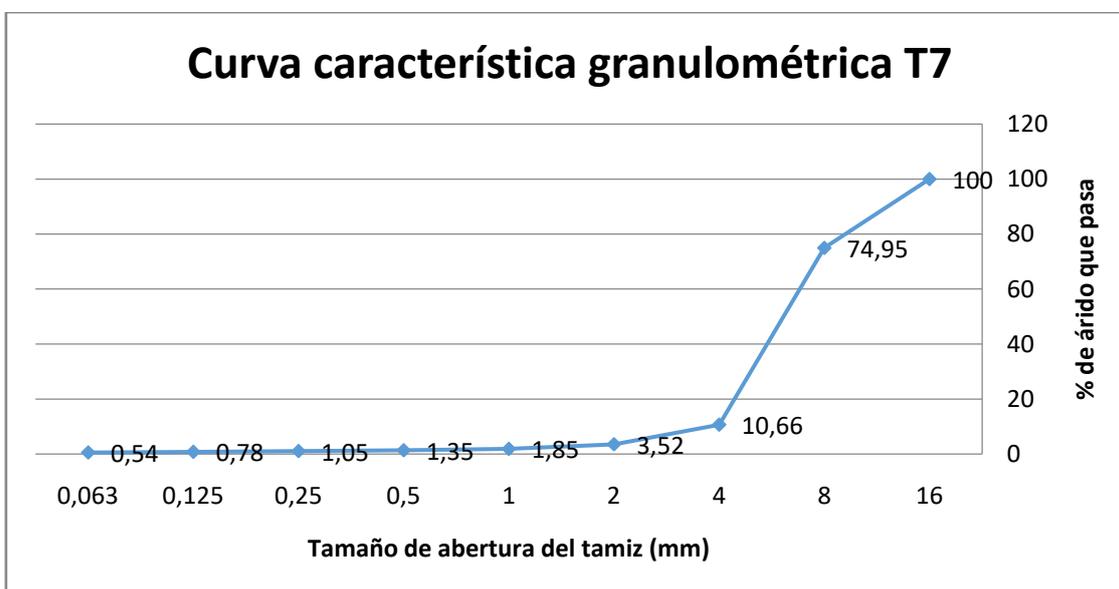


Figura 4.1.6.9. Curva característica granulométrica de la muestra de grava T7.

Los resultados obtenidos en el cálculo de la media para la grava son los siguientes:

Grava	Media de las muestras	
	% Retenido Acumulado	% Que pasa acumulado
16	0,233	99,766
8	25,851	74,149
4	89,173	10,827
2	96,485	3,515
1	98,138	1,862
0,5	98,657	1,343
0,25	98,972	1,028
0,125	99,252	0,748
0,063	99,502	0,498

Tabla 4.1.6.12. Porcentajes de grava retenida y grava que pasa a través de los tamices.

El módulo granulométrico de la grava se calcula según la ecuación (4.1.6.3), tal como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Módulo granulométrico} &= \frac{\sum_{i=1}^{i=9} \text{Media de \% retenido acumulado}}{100} = \\ &= \frac{0,233 + 25,851 + 89,173 + 96,485 + 98,138 + 98,657 + 98,972 + 99,252 + 99,502}{100} \\ &= 6,067 \end{aligned}$$

Módulo Granulométrico de la grava	6,067
--	--------------

4.2. INCORPORACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES.

En la actualidad en la mayoría de las industrias se genera una gran cantidad de residuos que no suelen ser reutilizables por el proceso industrial que los ha generado o por otro. Estos residuos pueden ser un inconveniente tanto para las industrias como para el medioambiente, debido a la cantidad que se genera como al tratamiento que deben recibir para no ser dañinos para el medio antes de ir al vertedero.

En este trabajo se investiga sobre la posible utilización de ciertos residuos industriales en la elaboración de hormigón. Se decidió por emplear residuos pertenecientes a la industria de la construcción y a la industria metálica de las empresas locales. Una vez estudiado los distintos residuos que nos podían ofrecer estas empresas, nos decantamos por una serie de ellos con buenas expectativas, siendo estos:

- Hormigón reciclado.
- Loza.
- Cerámica.
- Granalla.
- Escoria de soldadura.
- Viruta corta.
- Viruta larga.

Con respecto al porcentaje de sustitución de los áridos a realizar, se decidió optar por una sustitución del 20% para todos los áridos de la dosificación. La sustitución de los áridos estaría definida por el tamaño del material de sustitución, debido a que solo se sustituirán los áridos que tienen un tamaño similar al material de sustitución.

4.3 DOSIFICACIÓN UTILIZADA.

4.3.1 Introducción.

Para realizar el presente trabajo se ha calculado una dosificación de acuerdo con la investigación que se realizó y teniendo en cuenta las necesidades y la finalidad del mismo.

El hormigón fabricado estará destinado a la conformación de estructuras exteriores en ausencia de cloruros, sometidas a la acción del agua de lluvia, lo que se denomina "Exposición tipo IIb" según la E.H.E (Instrucción Española del Hormigón Estructural).

4.3.2 Normativa.

Para llevar a cabo la dosificación se ha tenido en cuenta la siguiente normativa:

Real Decreto 779/1997, de 30 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-97). BOE número 141, de 13 de Junio de 1997, páginas 18160 a 18169.

Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08). BOE número 203, de 22 de agosto de 2008, páginas 35176 a 35178.

4.3.3 Metodología.

En cuanto a la dosificación para esta investigación, objeto de este trabajo, se ha utilizado el método de A.C.I (American Concrete Institute) para hormigón convencional, en donde es posible establecer la resistencia a compresión que se quiere obtener.

El método A.C.I para hormigón convencional comienza estableciendo la relación agua/cemento según la importancia de la durabilidad o la resistencia del hormigón. Si el objetivo del hormigón es la durabilidad, la relación agua/cemento se obtiene de la siguiente tabla.

Tipo de estructura	Estructura mojada continuamente y expuesta a hielo y deshielo. (Con aireante)	Estructura expuesta al agua de mar o a los sulfatos
Secciones delgadas (barandillas, bordillos, detalles ornamentales y arquitectónicos, pilares, vigas y tubos en general, secciones con menos de 3 cm de recubrimiento)	0,45	0,4
Las restantes estructuras	0,5	0,45

Tabla 4.3.3.1. Relación agua / cemento en función de la finalidad del hormigón deseado.

En el caso de este trabajo, la relación agua/cemento sería de 0,45 debido a los tipos de estructuras de hormigón que se analizarán.

Pero si lo que se quiere fijar es la resistencia a compresión del hormigón, se deberá escoger la relación agua/cemento en función de la resistencia a la compresión deseada a los 28 días.

$$\frac{f_{cil}}{f_{cub}} = \mu \quad (4.3.3.1)$$

Para probetas cúbicas se debe tener en cuenta que la resistencia obtenida en la máquina de ensayo es diferente a la resistencia de las probetas cilíndricas. La relación de la resistencia obtenida en las probetas cúbicas y cilíndricas viene dada por la ecuación (4.3.3.1), donde μ es un valor que puede variar entre 0,66 y 0,97, dependiendo del tipo de hormigón. Para hormigones normales un valor conservador es 0,80. El Artículo 86.3.2 de la EHE-08 propone coeficientes de conversión de cúbica a cilíndrica en ausencia de ensayos con probetas cilíndricas.

Para este trabajo comprobaremos empíricamente el coeficiente μ haciendo probetas cilíndricas y cubicas.

Cuando f_c es menor que 60 MPa, el coeficiente de conversión propuesto es de 0,9.

Resistencia a compresión a 28 días (N/mm ²)	Relación agua/cemento, en peso	
	Hormigón sin aire incorporado	Hormigón con aireante
45	0,38	—
40	0,43	—
30	0,48	0,4
35	0,55	0,46
25	0,62	0,53
20	0,7	0,61
15	0,8	0,71

Tabla 4.3.3.2. Relación agua/cemento en función de la resistencia a compresión a 28 días del hormigón.

Para este trabajo se ha utilizado el valor de la relación agua cemento de la Tabla 4.3.3.1, referida a la durabilidad, ya que se trata del valor más conservador y porque desconocemos la resistencia al inicio del estudio.

El tamaño de árido debe ser lo mayor posible (entre 20 y 30 mm), por razones de economía de cemento y agua, pero no debe ser mayor a 1/5 de la dimensión menor de la pieza ni a 3/4 de la separación mínima entre armaduras.

En la siguiente tabla se recogen los tamaños del asiento en cm del cono de Abrams en función de lo que se vaya a construir con hormigones convencionales.

Tipo de construcción	Asiento (cm)	
	Máximo (con vibrado)	Mínimo
Muros de cimentación y cimientos armados	8	2
Cimentaciones, cajones y muros de hormigón en masa	8	2
Vigas y muros armados	10	2
Soportes de edificio	10	2
Pavimentos y losas	8	2
Grandes macizos	6	2

Tabla 4.3.3.3. Altura del cono de Abrams en función del tipo de construcción deseada.

Se ha considerado que los elementos que son objeto de este trabajo, están dentro de la tercera categoría y, por tanto, el asiento del cono de Abrams de las amasadas que se realizarán para la fabricación de los elementos del trabajo, deben estar comprendidas entre un máximo de 10 cm y un mínimo de 2 cm.

Para determinar la cantidad de agua en litros por m³ del hormigón, se tendrán en cuenta los parámetros de tamaño máximo de árido y asiento de cono de Abrams, para este caso estaríamos en torno a los 200 l/m³, ya que el tamaño máximo de árido es 16 mm y el cono de Abrams está entre 2 y 10 cm.

Asiento en el cono de Abrams (cm)	Agua, en l/m ³ , para los tamaños máximos, en mm.							
	10	12,5	20	25	40	50	70	150
Hormigón sin aire incorporado								
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	—
Aire ocluido en huecos en la masa, en %	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Hormigón con aire incorporado								
3 a 5	180	175	165	160	145	150	135	120
8 a 10	200	190	180	170	160	155	150	135
15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	—
Aire ocluido en huecos en la masa, en %	8	7	6	5	4,5	4	3,5	3

Tabla 4.3.3.4. Cantidad litros de agua por m³ de hormigón en función del asiento en el cono de Abrams.

En el método ACI la cantidad de árido grueso se puede determinar según el tamaño máximo y la finura de la arena. A partir de ello se calcula el contenido de árido fino en volumen, restándole a 1,025 la suma de los volúmenes de cemento, agua, aire y árido grueso.

Por otro lado se puede calcular el peso ya que es la diferencia entre el peso del hormigón fresco y la suma de los pesos de los otros componentes. En este caso, como tenemos tres tipos distintos de áridos, para obtener la proporción en la que deben mezclarse se ha recurrido al método de módulos granulométricos, ajustándolos a la parábola de Bolomey

Tamaño máximo (mm)	Volumen de conjunto del árido grueso, en 10^{-3} l/m ³ de volumen de hormigón, para diferentes módulos de finura de la arena			
	2,4	2,6	2,8	3
10	0,5	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,6
25	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,76	0,74	0,72	0,7
50	0,78	0,76	0,74	0,72
70	0,81	0,79	0,77	0,75
150	0,87	0,85	0,85	0,81

Tabla 4.3.3.5. Volumen de árido grueso en función de su tamaño máximo.

Parábola de Bolomey

Se puede calcular de una manera general la curva granulométrica adecuada de una mezcla de áridos. Existen varios métodos para obtener curvas adecuadas a cada caso, cada uno de los cuales tiene su propio campo de aplicación.

Para establecer la curva optima el método más aceptado es la parábola de Bolomey, la cual contempla una mayor proporción de áridos finos en la mezcla. Esto proporciona una mejor manejabilidad del hormigón en estado fresco.

En la siguiente figura se puede observar que se representan las aperturas de tamiz frente a los porcentajes de áridos que pasan a través de la luz o apertura de los

tamices, se puede apreciar cómo la curva granulométrica obtenida a partir de la ecuación de la parábola de Bolomey experimenta una variación continua de tamaño de las partículas frente a las curvas granulométricas de los tres áridos utilizados en este trabajo.

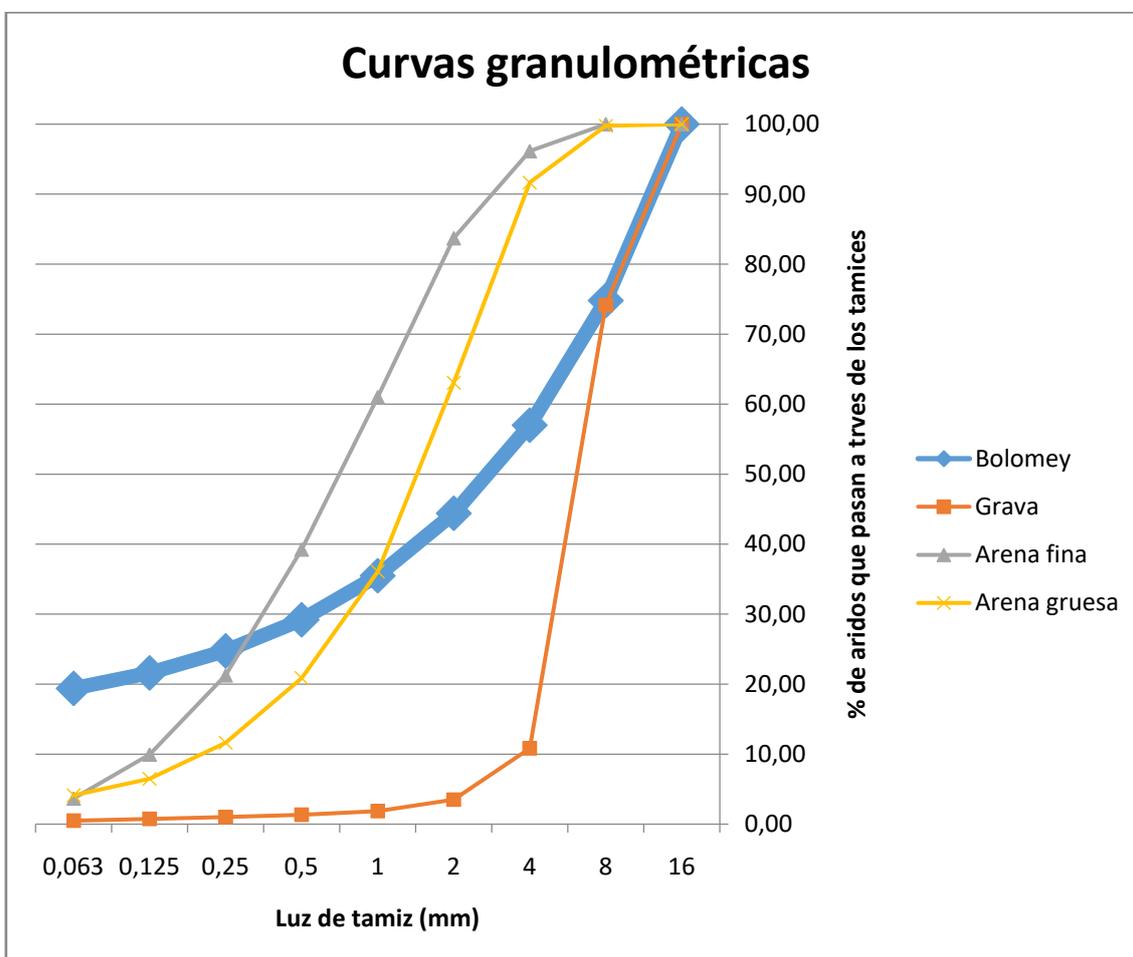


Figura 4.3.3.1. Curva de Bolomey comparada con las curvas granulométricas de los áridos utilizados.

La ecuación de la parábola de Bolomey:

$$p = a + (100 - a) * \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (4.3.3.2)$$

Donde:

p: es el porcentaje de peso que pasa por cada tamiz.

D: es la abertura de cada tamiz.

d: es el tamaño máximo del árido.

a: es una constante que depende de la consistencia del hormigón que queremos obtener y del tipo de árido que se va a utilizar.

Consistencia del hormigón	Valores de a	
	Áridos rodados	Áridos machacados
Seca y plástica	10	12
Blanda	11	13
Fluida	12	14

*Tabla 4.3.3.6. Valores del parámetro **a** de la curva de Bolomey en función de la consistencia que se quiere obtener.*

En este trabajo queremos una consistencia fluida y se han utilizado áridos machacados por lo que se empleará el valor de $a = 14$.

Para el ajuste granulométrico se puede utilizar un sistema de tanteos o uno teórico basado en los módulos granulométricos. Para este trabajo se utilizara el sistema teórico de módulos granulométricos ya que es más exacto.

El proceso se realiza de la siguiente manera. Se supone que el árido está fraccionado en $n+1$ tamaños, siendo, (n tamaños de áridos + cemento), se designan como $m_0, m_1, m_2 \dots m_n$ los módulos granulométricos de cada fracción y se llama $m_{t1}, m_{t2}, m_{t3}, \dots m_{tn}$, a los módulos granulométricos de las curvas de Bolomey cuyos tamaños máximos coinciden con las fracciones 1, 2, 3... n , se obtiene el siguiente sistema de $n+1$ ecuaciones con $n+1$ incógnitas:

$$t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n = 100 \quad (4.3.3.3)$$

$$m_{t1} = \frac{t_0 * m_0 + t_1 * m_1}{t_0 + t_1} \quad (4.3.3.4)$$

$$m_{t2} = \frac{t_0 * m_0 + t_1 * m_1 + t_2 * m_2}{t_0 + t_1 + t_2} \quad (4.3.3.5)$$

$$m_{tn} = \frac{t_0 * m_0 + t_1 * m_1 + t_2 * m_2 + \dots + t_n * m_n}{t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (4.3.3.6)$$

Donde:

t_0 : es el porcentaje de cemento.

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtendrán los valores correspondientes a $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ que se corresponderán con los porcentajes de cada árido.

4.3.4 Proceso de cálculo de dosificación.

Para realizar el proceso de cálculo tendremos en cuenta valores determinados en el apartado anterior, como son, el valor escogido de agua por m³ de hormigón que es de 200 l/m³ y la relación agua/cemento, siendo esta de 0,45.

Las densidades relativas del cemento y del agua se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Materiales	Densidades relativas (Kg/dm ³)	Peso del litro (Kg)
Cemento	3,10	1,12
Agua	1,00	1,00

Tabla 4.3.4.1. Valores de densidades relativas.

Como tenemos una combinación de tres áridos, el tamaño máximo de árido es la mínima abertura de tamiz que retiene menos del 25% del árido más grueso, siempre que pase el total por el tamiz de abertura doble. Estos valores están calculados a partir de las tablas de tamizado desglosadas en el Anexo 2 de este trabajo.

	Módulo granulométrico	Tamaño máximo (mm)
Arena fina	2,886	4
Arena gruesa	3,702	4
Grava	6,067	16

Tabla 4.3.4.2. Módulos granulométricos y tamaños máximos de áridos.

El porcentaje de cemento, denominado t₀ se obtiene aplicando las fórmulas que se muestra a continuación:

$$\frac{\frac{l \text{ de agua}}{m^3 \text{ de hormigón}}}{\frac{Kg \text{ agua}}{Kg \text{ de cemento}}} = \frac{200}{0,45} = 444,400 \left(\frac{Kg \text{ de cemento}}{m^3 \text{ de hormigón}} \right) \quad (4.3.4.1)$$

$$\frac{\frac{Kg \text{ de cemento}}{m^3 \text{ de hormigón}}}{\frac{Kg \text{ de cemento}}{dm^3 \text{ de cemento}}} = \frac{444,000}{3,1} = 143,369 \left(\frac{dm^3 \text{ de cemento}}{m^3 \text{ de hormigón}} \right) \quad (4.3.4.2)$$

$$\frac{\frac{dm^3 \text{ de cemento}}{m^3 \text{ de hormigón}} * 100}{dm^3 \text{ de hormigón}} = \frac{143,369 * 100}{1025} = \% \text{ Cemento} = 13,98 = t_0 \quad (4.3.4.3)$$

Para calcular un metro cúbico de hormigón, la suma de los volúmenes debe ser de 1025 litros, debido a que es necesario tener en cuenta la retracción que sufrirá la masa fresca de hormigón al endurecer. Por lo tanto para obtener 1000 l de hormigón endurecido se necesitan 1025 litros de masa fresca.

Una vez obtenido el porcentaje de cemento se sigue el procedimiento de cálculo de la parábola de Bolomey expuesto en el apartado anterior.

$$p = a + (100 - a) * \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (4.3.4.4)$$

Se obtendrán las curvas de áridos que cumplen a la perfección con la curva de Bolomey, clasificándolos por el tamaño máximo de árido.

En el Anexo 2 de análisis granulométrico, se puede apreciar que de los tamaños máximos de los áridos son 4 y 16 mm para las arenas y la grava respectivamente.

Tamaño apertura de tamiz (mm)	% que pasa		% retenido acumulado	
	D=16	D=4	D=16	D=4
16	100,00	100,00	0,00	0,00
8	74,81	100,00	25,19	0,00
4	57,00	100,00	43,00	0,00
2	44,41	77,90	55,59	22,10
1	35,50	62,28	64,50	37,72
0,5	29,20	51,23	70,80	48,77
0,25	24,75	43,42	75,25	56,58
0,125	21,60	37,90	78,40	62,10
0,063	19,40	34,03	80,60	65,97

Tabla 4.3.4.3. Curvas de áridos ideales en función de las ecuaciones de Bolomey.

Una vez obtenidos los valores de la ecuación (4.3.4.4), el siguiente paso es calcular los módulos granulométricos referidos a estos áridos ficticios de diámetro máximo 16 y 4 mm. Los módulos granulométricos se obtienen aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Módulo granulométrico} = \frac{\sum_{i=1}^{i=8} \% \text{ retenido acumulado}}{100} \quad (4.3.4.5)$$

$$mt1 (D = 4) = \frac{22,10 + 37,72 + 48,77 + 56,58 + 62,10}{100} = 2,272$$

$$mt2 (D = 16) = \frac{25,19 + 43,000 + 55,59 + 64,50 + 70,80 + 75,25 + 78,40}{100} = 4,127$$

Para obtener el porcentaje de cada tipo de áridos, se planteará el siguiente sistema:

$$t_0 + t_1 + t_2 = 100 \quad (4.3.4.6)$$

$$m_{t_2} * (t_0 + t_1 + t_2) = m_1 * t_1 + m_2 * t_2 \quad (4.3.4.7)$$

$$m_{t_3} * (t_0 + t_1 + t_2 + t_3) = m_1 * t_1 + m_2 * t_2 + m_3 * t_3 \quad (4.3.4.8)$$

Donde:

m_i : es el módulo granulométrico de los áridos

m_{ii} : son los módulos granulométricos de las características de los áridos obtenidos mediante la ecuación de la parábola de Bolomey.

t_i : son los porcentajes de cada árido, siendo t_0 el porcentaje de cemento.

4.3.5 Resultados.

La solución al sistema propuesto en el apartado anterior se muestra en la siguiente tabla.

Solución del sistema			
t_1	t_2	t_3	t_0
% Arena fina	% Arena gruesa	% Grava	% Cemento
26,083	11,028	48,902	13,98

Tabla 4.3.5.1. Porcentajes de cada tipo de árido y cemento.

Aplicando ahora estos porcentajes a las curvas granulométricas de cada árido y combinándolas proporcionalmente, se obtiene el tamizado teórico del nuevo árido compuesto por los tres áridos.

Nueva mezcla de áridos	
Tamiz	% que pasa acumulado
16	99,988
8	87,333
4	54,471
2	44,494
1	34,790
0,5	27,178
0,25	21,318
0,125	17,663
0,063	15,639

Tabla 4.3.5.2. Tamizado de mezcla de resultado de áridos.

Obtenidos estos resultados se puede estudiar la curva granulométrica de la nueva mezcla, esta se debería ajustar lo más posible a la parábola de Bolomey.

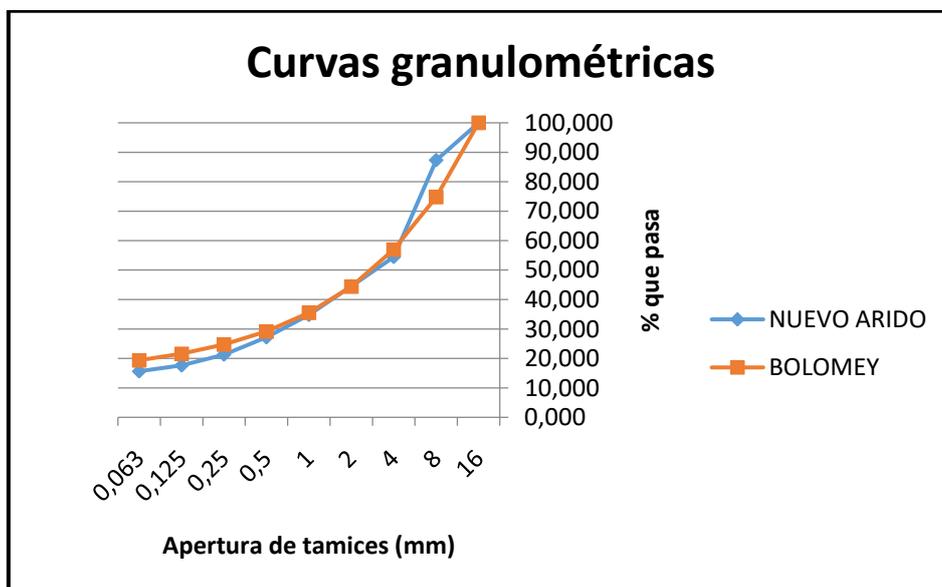


Figura 4.3.5.3 Comparación de curva granulométrica de la mezcla de áridos obtenida y la curva granulométrica de Bolomey.

Teniendo en cuenta los porcentajes obtenidos, la dosificación para 1 metro cúbico de hormigón se obtiene la dosificación que se va a emplear en la serie A en este estudio y se puede apreciar en la siguiente tabla.

Dosificación para 1025 I			
Tipo	Volumen [l]	Densidades relativas [kg/l]	Peso (Kg)
Cemento	143,37	3,1	444,44
Agua	200,00	1	200,00
Grava	387,59	2,65	1027,12
Arena gruesa	87,41	2,6	227,26
Arena fina	206,73	2,6	537,50
Total áridos	681,63		
Total hormigón	1025		

Tabla 4.3.5.4 Resultado de la dosificación para las probetas.

Debido a que esta dosificación requería una cantidad de cemento bastante conservadora, para la realización de las vigas se ha calculado una nueva dosificación con una cantidad de cemento menor, cuyo ensayo ha sido posterior y corresponde a las vigas y la serie B de las probetas.

Dosificación para 1025 I			
Tipo	Volumen [l]	Densidades relativas [kg/l]	Peso (Kg)
Cemento	129,03	3,1	400,00
Agua	180,00	1	180,00
Grava	406,44	2,65	1077,06
Arena gruesa	51,70	2,6	134,42
Arena fina	269,49	2,6	700,67
Total áridos	715,97		
Total hormigón	1025		

Tabla 4.3.5.5 Resultado de la dosificación para las vigas.

4.4 ENSAYOS DE ABSORCIÓN DE AGUA.

4.4.1 Introducción.

Una vez obtenida la dosificación adecuada para este trabajo, se ha procedido a realizar un ensayo de absorción de agua para ajustar la cantidad de esta en la amasada, teniendo en cuenta que se va a hacer una sustitución de áridos por parte de los materiales de desechos industriales.

Este ensayo nos sirve para determinar la diferencia de absorción que hay entre los áridos y los materiales de sustitución, realizando un reajuste en la cantidad de agua de cada amasada.

4.4.2 Infraestructuras, instalaciones y equipos.

Vasos medidores

Se han utilizado vasos medidores para ajustar las cantidades de material y de agua en el ensayo.

Tela de tamiz

Utilizada para separar el agua de los materiales que se han utilizado para realizar el ensayo.

Cronómetro

Reloj que permita la apreciación de 1 segundo.

Balanza de precisión

Balanza con una exactitud de $\pm 0.1\%$ de la masa en la porción de ensayo.

4.4.3 Metodología.

En este ensayo se han utilizado tres tipos de áridos: arena fina, arena gruesa y grava, además de los materiales de residuos industriales con los que vamos a realizar las sustituciones de áridos: hormigón reciclado, loza, cerámica, escoria de soldadura, granalla y viruta CA. La viruta LA se descarto para realizar este ensayo por su difícil trabajabilidad.

Para realizar en ensayo de absorción se han utilizado 500 ml de cada material y 500 ml de agua, medidos en un vaso medidor de un litro.

Se pesan los 500 ml de material de forma que tenemos el peso de estos antes de ser mezclados con el agua.

Una vez que tenemos las cantidades adecuadas, se mezclan los materiales con el agua en otro vaso medidor durante unos 5 minutos, para que el material tenga suficiente tiempo para absorber el agua.



Figura 4.4.3.1. Vaso medidor con material en agua y vaso medidor con tamiz.

Transcurrido el tiempo de absorción por parte del material, se procede a separar el material y el agua en un vaso medidor con una tela de tamiz, de forma que el agua sobrante que no ha sido adsorbida por el material se separe de este.



Figura 4.4.3.2. Vaso medidor con tela de tamiz.

Se deja el material en la tela de tamiz durante unos 10 minutos aproximadamente para que el agua sobrante caiga en su totalidad al vaso medidor quedando solo en agua retenida en el material. Transcurrido este tiempo se saca el material de la tela de tamiz y se deposita de nuevo en el vaso medidor para proceder a realizar el segundo pesado del material.



Figura 4.4.3.3. Vaso medidor con agua sobrante y recipiente con el material

A continuación se pesa el agua sobrante que estuvo con el material, de esta forma, se sabe la cantidad de agua de los 500 ml iniciales que se queda adsorbida en el material.

Los resultados obtenidos correspondientes a todos los materiales se adjuntan en el Anexo 3 de este trabajo.

4.4.4 Proceso de cálculo de absorción de agua.

Una vez explicado el proceso en el apartado anterior de metodología, se procede en este apartado a explicar el proceso de cálculo realizado para ajustar la cantidad de agua en la amasada.

Una vez obtenidos los pesos del material y el peso del agua sobrante después de la absorción, se procede a calcular el porcentaje de absorción por parte de los materiales.

Donde:

a_i : es el peso del agua inicial (500ml).

b_i : es el peso del agua sobrante después de la absorción.

c_i : es el peso del agua absorbida por el material.

$$c_i = a_i - b_i \quad (4.4.4.1)$$

Una vez calculado el peso del agua absorbida por el material, se calcula el porcentaje de absorción del material.

Donde:

d_i : es el porcentaje de adsorción.

$$d_i = \frac{c_i \times 100}{a_i} \quad (4.4.4.2)$$

Calculado el porcentaje de absorción de cada material, se procede a calcular la cantidad ajustada de agua necesaria para la amasada.

Este cálculo varía en función del tipo de áridos a sustituir y del porcentaje de sustitución de estos. Esto se debe a que no en todas las amasadas se sustituye el mismo tipo de árido, pero en cambio el porcentaje de sustitución es el mismo para todas estas, del 20 % de un tipo de árido (grava, arena fina y arena gruesa).

Para este caso se realizara un ajuste del agua en el que interviene la sustitución de los tres tipos de áridos.

Donde:

$c_i a$: es el peso del agua absorbida por la grava.

$c_i b$: es el peso del agua absorbida por la arena fina.

$c_i c$: es el peso del agua absorbida por la arena gruesa.

E_i : es el peso del agua absorbido por los tres áridos correspondiente a la amasada en blanco.

$$E_i = c_i a + c_i b + c_i c \quad (4.4.4.3)$$

Una vez calculado el peso del agua absorbido por los tres áridos en una amasada en blanco, se calcula la adsorción de las demás amasadas con materiales de sustitución teniendo en cuenta el porcentaje de áridos a sustituir.

Donde:

$c_i d$: es el peso del agua absorbida por en material de sustitución.

$p_i a$: es el porcentaje de árido que no se sustituye.

$p_i b$: es el porcentaje de árido que se sustituye.

F_i : es el peso del agua absorbido por los tres áridos y los materiales de sustitución.

$$F_i = c_i a \times p_i a + c_i b \times p_i a + c_i c \times p_i a + c_i d \times p_i b \quad (4.4.4.4)$$

Como en el estudio se van hacer comparaciones entre los distintos hormigones con sustitución, se necesita tener un hormigón sin sustitución que denominaremos blanco. Por tanto, lo primero que se calcula es la cantidad de agua necesaria para la amasada en blanco.

A continuación se calcula el ajuste de agua, teniendo en cuenta como base la cantidad de agua necesaria para la amasada en blanco.

Donde:

A_i: es la cantidad de agua en litros de la amasada en blanco.

B_i: es la cantidad ajustada de agua en litros de la amasada.

$$B_i = \frac{E_i \times A_i}{F_i} \quad (4.4.4.5)$$

Calculado B_i conocemos la cantidad ajustada de agua necesaria para realizar la amasada, para cada tipo de hormigón.

4.4.5 Resultados.

Conocida la cantidad de agua necesaria para cada tipo de hormigón realizamos las amasadas ajustándonos a las relaciones agua/cemento que especificamos en el punto 4.3.3. Así evitaremos que las propiedades del hormigón con residuos tengan mayor o menor resistencia y mayor o menor trabajabilidad debido a las distintas capacidades de absorción de agua de los materiales que añadamos.

Además es importante ya que en determinadas amasadas se ahorra hasta un 9,20% de agua, lo cual es un factor a tener en cuenta a la hora de ahorrar recursos hídricos.

Los resultados obtenidos correspondientes a este estudio de absorción se adjuntan en el Anexo 3 de este trabajo. En él se puede apreciar la absorción de agua de cada material y el ajuste que hay que hacer en la cantidad del agua añadida en la producción de hormigones.

En la siguiente gráfico se pueden apreciar los porcentajes de absorción de todos los materiales.

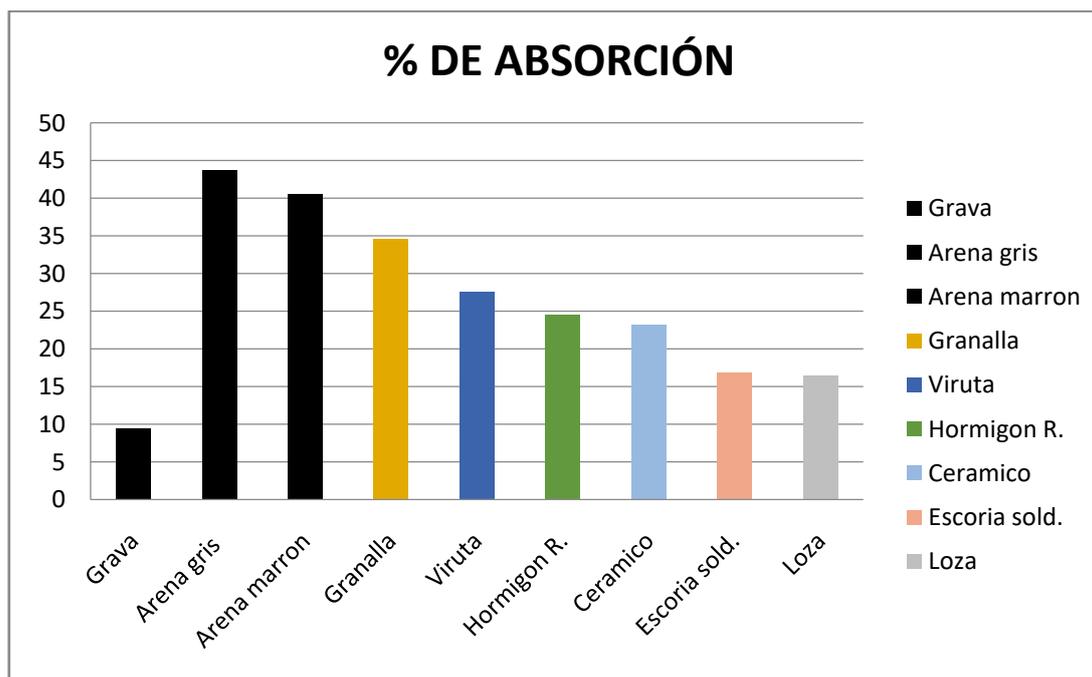


Figura 4.4.5.1. Grafica con los porcentajes de adsorción de los materiales.

Como se aprecia en la grafica los materiales de sustitución tienen un porcentaje absorción menor que los áridos salvo la grava, la escoria de soldadura y la loza son los materiales con un menor porcentaje de absorción. Debido a esto la cantidad de agua necesaria en cada amasada será distinta, y se ajustara en cada una.

5. CÁLCULO DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO.

La viga objeto de estudio de este trabajo tiene unas dimensiones de 116 cm de longitud total, 18 cm de canto y 15 cm de ancho, está soportada por dos apoyos articulados que miden, en planta, el mismo ancho que tiene la viga, y 10 cm de largo. La luz estructural es de 106 cm. Se considera que la viga está sometida a dos cargas externas de 17,16 kN, cada una de ellas ubicada a 35 cm del eje del apoyo y, por tanto, a 40 cm del extremo de la viga. El hormigón empleado tiene una resistencia característica de 30 MPa y el acero de 500 MPa. El tamaño máximo del árido es de $D_{\max} = 8$ mm, y el recubrimiento de $r + \Delta r = 20$ mm.

5.1 CÁLCULO DE ESFUERZOS Y DIAGRAMAS.

La carga correspondiente al peso propio de la viga se puede despreciar, debido a que es insignificante con respecto a la carga externa que deba soportar y los cálculos teniendo en cuenta el peso propio arrojarían los mismos resultados como se va a demostrar.

Despreciando el peso propio, las reacciones en los apoyos serán iguales a las cargas aplicadas:

$$\text{Reacciones en los apoyos} = 2 * R = 17,16 \text{ kN} * 2 = 35 \text{ kN} \rightarrow R = 17,16 \text{ kN} \quad (5.1.1)$$

Lo primero es calcular los diagramas de flectores y cortantes, para determinar los puntos críticos de la viga que se corresponden con los puntos donde son máximos los momentos flectores y el cortante.

El flector es nulo en los apoyos y crece linealmente hasta los puntos de aplicación de las cargas, puntos en donde el flector se hace máximo, valiendo:

$$M_{f,\max} = R * 35 \text{ cm} = 17,16 \text{ kN} * 0,35 \text{ m} = 6,006 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (5.1.2)$$

A partir de esos dos puntos el flector se mantendrá constante, situado entre las dos cargas de la viga, ya que no hay más cargas aplicadas en la zona.

Si se tiene en cuenta el peso propio de la viga al determinar el flector máximo antes calculado ($M_{f,\max}$) habrá que añadirle un flector de valor $M_{f,pp,\max} = (p \cdot l^2)/8$, siendo l la luz estructural de 1,06 m, y p la carga uniformemente repartida que supone dicho peso propio. Suponiendo un peso específico de 2,4 t/m³ (2.400 kp/m³ \approx 24 kN/m³), y teniendo en cuenta que la sección de la viga es de 0,15 x 0,18 m², eso supone que p vale (24 kN/m³ · 0,15 x 0,18 m² =) 0,648 kN. Ahora se puede calcular el $M_{f,pp,\max} = p \cdot l^2/8 = 0,648 \text{ kN/m} \cdot (1,06\text{m})^2/8 = 0,0085 \text{ kN} \cdot \text{m}$. El flector máximo en la viga, teniendo en

cuenta el peso propio de esta, sería de $6,091 \text{ kN}\cdot\text{m} \approx 6 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Por lo que se va a seguir despreciando el peso propio.

El cortante máximo se producirá en los apoyos, y su valor será el de las reacciones en los mismos, de valor $V_{\max} = R = 17,16 \text{ kN}$. Este cortante se mantiene constante entre el apoyo y el punto de aplicación de la carga más cercana a dicho apoyo. Entre los puntos de aplicación de las cargas el cortante es nulo, al ser el cortante igual en ambos puntos y no haber ninguna carga aplicada en esta zona.

5.2 DIMENSIONADO DE ARMADURAS LONGITUDINALES.

Cálculo del momento límite (M_{lim}):

$$M_{\text{lim}} = f_{\text{cd}} * b * y_{\text{lim}} * \left(d - \frac{y_{\text{lim}}}{2} \right) \quad (5.2.1)$$

Donde:

f_{cd} : es la resistencia de cálculo del hormigón.

$$f_{\text{cd}} = \frac{f_{\text{ck}}}{\gamma_c} = \frac{30 \text{ MPa}}{1} = 30 \text{ MPa} \quad (5.2.2)$$

Donde:

$\gamma_c = 1$, Para conseguir que en el ensayo el coef. de seguridad sea 1.

b : es el ancho de la viga.

$$y_{\text{lim}} = 0,8 \cdot x_{\text{lim}}$$

x_{lim} : es la profundidad de la fibra neutra para el momento límite.

d : es el canto útil de la viga.

ϵ_{cu} : es el acortamiento del hormigón.

ϵ_y : es la deformación correspondiente al límite elástico del acero.

Para x_{lim} debe darse la situación el cual se verifica que:

$$\frac{x_{\text{lim}}}{\epsilon_{\text{cu}}} = \frac{d}{\epsilon_{\text{cu}} + \epsilon_y} = \frac{d}{\epsilon_{\text{cu}} + \frac{f_{\text{yd}}}{E_s}} \Rightarrow \frac{x_{\text{lim}}}{0,0035} = \frac{d}{0,0035 + \frac{f_{\text{yk}}}{200000}} \quad (5.2.3)$$

Si tomamos $\gamma_s = 1$ (para conseguir en el ensayo que el coeficiente de seguridad sea 1)

y, por tanto, $f_{\text{yd}} = f_{\text{yk}} = 500 \text{ MPa}$, resulta ser $x_{\text{lim}} = 0,583 \cdot d$

$$\text{Por tanto: } y_{\text{lim}} = 0,8 \cdot x_{\text{lim}} = 0,8 \cdot 0,583 \cdot d = 0,47 \cdot d \quad (5.2.4)$$

La EHE-08 establece que para este caso el recubrimiento mínimo debe ser de 35 mm.

Pero con las dimensiones tan reducidas que tiene la viga, si se deja un recubrimiento

de 35 mm parte de la armadura no podría doblarse para conseguir las dimensiones necesarias, por lo que se ha dispuesto un recubrimiento de 20 mm.

Se estimara que las armaduras longitudinales de tracción son de 10 mm de diámetro ($\phi_l = 10 \text{ mm}$), y que las transversales son de 8 mm de diámetro ($\phi_t = 8 \text{ mm}$), de acuerdo con la EHE-08, debe ser:

$$d = h - \left[\max(1,25 \cdot D_{max}, r + \Delta r) + \phi_t + \frac{\phi_l}{2} \right] = 180 - [\max(1,25 \cdot 8, 20) + 6 + 4] = 147 \text{ mm.} \quad (5.2.5)$$

$$y_{lim} = 0,8 * 0,583 * 147 = 68,6 \text{ mm} \quad (5.2.6)$$

Por tanto:

$$M_{lim} = f_{cd} * b * y_{lim} * \left(d - \frac{y_{lim}}{2} \right) = 30 \text{ MPa} * 147 \text{ mm} * 68,6 \text{ mm} * \left(150 \text{ mm} - \frac{70 \text{ mm}}{2} \right) = 34,79 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (5.2.7)$$

Se verifica que:

$$M_{lim} > M_{Máx} \\ 34,79 \text{ kN} \cdot \text{m} > 6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Esto significa que habrá rotura dúctil aunque no existan armaduras longitudinales para compresión en la zona superior de la viga.

A continuación se calculará el número de barras longitudinales necesarias a tracción en la parte inferior de la misma haciendo sumatorio de fuerzas y momentos en la sección central de la viga:

$$\sum F = 0 \Rightarrow T_{s1}(\text{tracción en las armaduras}) = C_c(\text{compresión en el hormigón}) \Rightarrow A_{s1} \cdot f_{yd} = f_{cd} \cdot b \cdot y \Rightarrow A_{s1} \cdot 500 \text{ MPa} = 30 \text{ MPa} \cdot 149 \text{ mm} \cdot y \quad (5.2.8)$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow C_c \cdot z(\text{brazo mecánico}) = M_d \Rightarrow f_{cd} \cdot b \cdot y \cdot \left(d - \frac{y}{2} \right) = M_d \Rightarrow 30 \text{ MPa} \cdot 147 \text{ mm} \cdot y \cdot \left(147 \text{ mm} - \frac{y}{2} \right) = 6 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (5.2.9)$$

Se ha tomado $M_d = M_k$, es decir, se ha tomado $\gamma_f = 1$, para conseguir en el ensayo que el coeficiente de seguridad sea 1.

De esta ecuación se obtienen dos soluciones para y , de los cuales sólo hay un valor valido que es:

$$y = 13,84 \text{ mm}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (8.2.8) del sumatorio de fuerzas se calcula A_{S1} :

Donde:

A_{S1} : es sección del acero.

$$A_{S1} = \frac{30 \text{ MPa} \cdot 147 \text{ mm} \cdot 13,84 \text{ mm}}{500 \text{ MPa}} = 122,06 \text{ mm}^2 \quad (5.2.10)$$

Se han probado distintos \emptyset y combinaciones de barras de acero corrugado para que cumplan con dicha sección:

$$3\emptyset 10 = 235,62 \text{ mm}^2 > 122,06 \text{ mm}^2 \text{ CUMPLE}$$

$$2\emptyset 10 = 157,08 \text{ mm}^2 > 122,06 \text{ mm}^2 \text{ CUMPLE}$$

$$1\emptyset 10 = 78,54 \text{ mm}^2 < 122,06 \text{ mm}^2 \text{ NO CUMPLE}$$

En vigas la cuantía geométrica mínima para la armadura de tracción es de 0,0033 y 0,0028 para aceros de 400 y 500 MPa, y un 30% de dicha cuantía para la zona de compresión (0,00099 para aceros de 400 MPa y 0,00084 para 500 MPa).

Por otro lado, la capacidad mecánica del acero traccionado U_s debe ser, al menos (cuantía mecánica mínima), un 4% de la del hormigón. Es decir: $U_s = A_s \cdot f_{yd} \geq 4\% \cdot U_c = 4\% \cdot A_c \cdot f_{cd}$. Esta cuantía mínima es menos exigente que la geométrica, salvo si $f_{ck} > 45$ MPa.

Teniendo en cuenta todo lo anterior resultan cuantías mínimas a tracción menores que la que se ha dispuesto, y para la armadura de compresión resultan dos barras de 6 mm de diámetro, pero debido a que la empresa que realiza las armaduras no trabaja con esta sección se han utilizado dos barras de 8 mm de diámetro.

5.3 DIMENSIONADO DE ARMADURAS TRANSVERSALES.

5.3.1 Agotamiento de la sección por compresión oblicua del alma.

$$V_{rd} \leq V_{u1}$$

En este caso $V_{rd} = V_d$, debido a que no hay pretensado ni cambios de sección a lo largo de la viga.

Donde:

V_d :es el esfuerzo cortante de cálculo en el borde interior del apoyo.

V_{rd} :es el esfuerzo cortante efectivo de cálculo.

El cortante máximo en el eje del apoyo es de 17,16 kN. Como el apoyo tiene 10 cm de largo, V_d es el cortante que hay a 5 cm del eje del apoyo que en este caso es de 15,54 kN, por triángulos semejantes ($l/2 = 53$ cm):

$$\frac{17,16 \text{ kN}}{53 \text{ cm}} = \frac{V_d}{(53-5) \text{ cm}} \Rightarrow V_d = 15,54 \text{ kN} \quad (5.3.1.1)$$

Aplicando la correspondiente fórmula de la EHE-08 para el agotamiento de bielas, para fisuras de cortante a 45° y estribos colocados perpendicularmente a la viga.

Donde:

V_{u1} : es el esfuerzo cortante de agotamiento por compresión en el alma .

$$V_{u1} = k * f_{1cd} * b_0 * d * \frac{\cotg 45 + \cotg 90}{1 + \cotg^2 90} \quad (5.3.1.2)$$

Donde:

f_{1cd} : es la resistencia a compresión del hormigón.

$k = 1$ por no tratarse de una estructura pretensada

$$f_{1cd} = 0,60 * 30 \text{ Mpa}$$

Se sustituye:

$$V_{u1} = 1 * 0,6 * 30 * 147 * \frac{\cotg 45 + \cotg 90}{1 + \cotg^2 90} = 198,45 \text{ kN}$$

$$V_{rd} \leq V_{u1}; 15,54 \text{ KN} \leq 198,45 \text{ KN}$$

CUMPLE y, por tanto, las bielas de hormigón resisten la compresión.

No es necesario aumentar la sección (b o d), ni tampoco la resistencia del hormigón. Dado que del lado de la seguridad si se toma $V_d = 17,16 \text{ kN}$ el resultado es el mismo.

5.3.2 Agotamiento de la sección por tracción soportada por hormigón y acero.

A una distancia de un canto útil $d = 147$ mm a partir del eje del apoyo, debe verificarse.

Donde:

V_{u2} : es el esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma.

V_{cu} : es la contribución del hormigón a la resistencia a esfuerzo cortante.

V_{su} : es el esfuerzo cortante de agotamiento.

$$V_{rd} \leq V_{u2} = V_{cu} + V_{su} \quad (5.3.2.1)$$

Calculando por triángulos semejantes, el cortante de cálculo a una distancia de un canto útil $d = 147 \text{ mm}$ será:

$$\frac{17,16 \text{ kN}}{53 \text{ cm}} = \frac{V_d}{(53-15) \text{ cm}} \Rightarrow V_d = 12,30 \text{ kN} \quad (5.3.2.2)$$

En primer lugar hay que comprobar la contribución del hormigón, con la siguiente ecuación, propuesta por la EHE-08:

$$V_{cu} = \left[\frac{0,15}{\gamma_c} * \xi * (100 * \rho_l * f_{cv})^{\frac{1}{3}} + 0,15 * \sigma'_{cd} \right] * \beta * b_0 * d \quad (5.3.2.3)$$

Donde:

$$\sigma'_{cd} = 0 \text{ por tratarse de una viga sin pretensado}$$

$$\rho_l = \frac{A_{S1}}{b_0 * d} = \frac{122,06 \text{ mm}^2}{150 \text{ mm} * 147 \text{ mm}} = 0,0055 \quad (5.3.2.4)$$

$$\xi = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) = 2,15 < 2; \text{ en este caso es mayor que 2, por lo que } \xi = 2 \quad (5.3.2.5)$$

Sustituyendo los datos:

$$V_{cu} = 16,88 \text{ kN}$$

$$V_{rd} = 12,30 \text{ kN} < V_{cu} = 16,88 \text{ kN}$$

CUMPLE, por lo que, estrictamente, no necesitaría armadura a cortante.

Habría que disponer de una cuantía mínima, según lo establecido por la EHE-08 en su Artículo 44.2.3.4.1:

- $\Sigma \frac{A_\alpha \cdot f_{y\alpha,d}}{\text{sen } \alpha} \geq \frac{f_{ct,m}}{7,5} \cdot b_0$
 - $f_{y\alpha,d} = \min(f_{yd}, 400 \text{ MPa})$
 - $\text{sen } \alpha = \text{sen } 90 = 1$
 - $b_0 = b$
 - $f_{ct,m} = \text{resistencia media a tracción a 28 días}$
 - $f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$ si $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$

$$\bullet f_{ct,m} = 0,58 \cdot f_{ck}^{1/2} \text{ si } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

Teniendo en cuenta el Art. 44.2.3.4.1 de la EHE-08 con respecto a distancia entre estribos, nos encontramos en el caso 1 de dicho artículo, por lo que aplicaremos la fórmula de dicho artículo, la separación entre estribos debe ser menor o igual a 11,25 cm. Como estas distancias se redondean de 5 en 5 cm, resulta una distancia de 10 cm entre estribos. Aplicando la anterior fórmula de la cuantía mínima, disponiendo un estribo de 6 mm cada 10 cm se cumple el requisito de armadura mínima.

Si se tomara $V_d = 17,16 \text{ kN}$, el resultado sería el mismo.

$$V_{rd} = 17,16 \text{ kN} > V_{cu} = 16,88 \text{ kN}$$

NO CUMPLE, por lo que necesita armadura a cortante.

Habrá que disponer de armadura a cortante para la diferencia entre lo que soporta el hormigón (V_{cu}) y el total de cortante a soportar (V_{rd}):

$$V_{su} = V_d - V_{cu} = 17,16 - 16,88 = 0,28 \text{ kN} \quad (5.3.2.6)$$

$$V_{su} = z * \text{sen } \alpha * (\text{cotg } \alpha + \text{cotg } \theta) * \sum A_{\alpha} * f_{y\alpha,d} \quad (5.3.2.7)$$

Podemos estimar el brazo mecánico z , mediante la fórmula: $z \approx 0,9 * d$

$f_{y\alpha,d} = 400 \text{ MPa}$ valor máximo para las armaduras pasivas de cortante

$$A_{90} = \frac{280}{0,9 * 147 * \text{sen } 90 * (\text{cotg } 90 + \text{cotg } 45) * 400 \text{ MPa}} = 0,029 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} \quad (5.3.2.8)$$

$$A_{90} = 0,029 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} = 0,29 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

Para calcular la separación longitudinal entre armaduras (art. 44.2.3.4.1 de la EHE-08) se está en el caso en el que $V_d \leq V_{u1} * \frac{1}{5}$.

$$V_d \leq V_{u1} * \frac{1}{5} \quad 17,16 \text{ KN} \leq 39,69 \text{ KN}$$

Donde:

S_t : es la separación mínima entre estribos.

$$S_t \leq 0,75 * d \leq 60 \text{ cm}$$

$$S_t = 0,75 * 14,7 = 11,025 \text{ cm}$$

Estas distancias se redondean de 5 en 5 cm, tomamos una separación transversal entre cercos de $S_t = 10$ cm, para facilitar la construcción del armado.

$$A_{90} = 1c\emptyset 6 / 10cm = 0,144 \text{ cm}^2 / 10 \text{ cm} > 0,29 \text{ cm}^2 / 10 \text{ cm} \quad \text{CUMPLE}$$

Debido a que la empresa que realiza las armaduras no trabaja con esta sección se ha utilizado una sección de 8 mm de diámetro.

Los resultados obtenidos para proyectar la armadura son:

$$A_{s1} = 2\emptyset 10$$

$$A_{s2} = 2\emptyset 8$$

$$1c\emptyset 8 / 10cm$$

6. PROCESO EXPERIMENTAL.

6.1 INTRODUCCIÓN.

En este apartado se explican los procesos de cada ensayo necesarios para la realización del trabajo objeto de esta investigación, teniendo en cuenta en este apartado la normativa, materiales, procesos y la metodología de ejecución realizada en el laboratorio.

Una vez realizado el proceso de amasado y fabricación de las probetas y vigas, se han realizado los siguientes ensayos:

- Ensayo a compresión de probetas de hormigón.
En este ensayo se comprueba la resistencia a compresión de las probetas, de acuerdo con la normativa vigente.
- Ensayo a flexión y cortante de vigas de hormigón armado.
En este ensayo en el que se comprueba la resistencia a flexión y a cortante de las vigas objeto de este trabajo. Para estos ensayos no existe una normativa, por lo que se han establecido unos procedimientos específicos para estos ensayos.

6.2 AMASADO Y PREPARACIÓN DE VIGAS Y PROBETAS.

6.2.1 Introducción.

Utilizando las dosificaciones que se han calculado en el capítulo 4 de este trabajo, procedemos a la realización del amasado necesario para la fabricación del hormigón que constituirá las probetas y vigas objeto de este trabajo, aplicando la normativa correspondiente que se nombra a continuación.

Inicialmente se ha realizado una primera dosificación para las probetas de la serie A, con esto obtendríamos los primeros resultados en cuanto a la resistencia de nos darían las probetas con los distintos materiales a la hora de sustituir los áridos. Una vez obtenidos los primeros datos de la resistencia de las probetas y valorando los resultados obtenidos de cada material, se calculo otra dosificación para realizar las amasadas de la serie B de probetas y las vigas, ajustando mejor la cantidad de cemento utilizada.

6.2.2 Normativa.

Ministerio de Fomento, 2008a. Instrucción para la recepción de cementos RC-08. Ministerio de Fomento.

Ministerio de Fomento, 2008b. Instrucción de hormigón estructural EHE-08. Ministerio de Fomento.

UNE-EN 197-1, "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes". Diciembre 2011: MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-1, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes". Agosto 2013. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-2, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia". Julio 2015. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-3, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas". Diciembre 2011. MADRID AENOR

UNE-EN 12350-1, "Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras". Noviembre 2009. MADRID: AENOR

UNE-EN 12350-2, "Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento." Noviembre 2009. MADRID: AENOR

6.2.3 Infraestructuras, materiales y equipos.

Cono de Abrams

Se utiliza para comprobar la consistencia del hormigón de las probetas del ensayo. Se trata de un molde fabricado con un metal que no se ve afectado por los componentes del cemento y de un espesor no inferior a 1,5 mm. El interior del molde debe ser uniforme y tendrá forma de cono con su parte inferior y superior abiertas, permitiendo así que la probeta pueda desmoldarse sin problemas.

El cono de Abrams tiene las siguientes medidas (UNE-EN 12350-2:2009):

Diámetro inferior: 200 ± 2 mm.

Diámetro superior: 100 ± 2 mm.

Altura: 300 ± 2 mm.

Barra compactadora

Barra de sección transversal circular, fabricada en acero y con los extremos redondeados, con las siguientes medidas:

Longitud: 600 ± 5 mm.

Diámetro: 16 ± 1 mm.

Regla

Regla metálica graduada desde 0 a 300mm, con divisiones de cada 5mm

Chapa base

Chapa plana rígida, donde se coloca el cono de Abrams de una forma segura, que debe estar siempre colocado sobre una superficie perfectamente horizontal.

Paleta

Herramienta de trabajo con hormigón fresco, con la boca de sección cuadrada.

Llana

Herramienta de trabajo con hormigón fresco, que se utiliza para dar un acabado uniforme al hormigón.

Amasadora

Amasadora de la marca Ibertest de 20 litros de capacidad, con recipiente de amasado desmontable.

Cubos o recipientes

Recipientes de goma utilizados para transportar los áridos en la cantidad necesaria para su amasado.

Fluidificante

Aditivo fluidificante Sika ViscoCrete-3425, que es un superplastificante de altas prestaciones, con lo que se consigue una mayor fluidez y una mayor trabajabilidad de los hormigones sin disminuir su resistencia.

Encofrado de viga

Es un armazón desmontable constituido por planchas de madera y metal a modo de molde para la fabricación de estructuras de hormigón.

El encofrado utilizado en la realización del trabajo, dando a las vigas las siguientes medidas:

Longitud: 116 cm.

Ancho: 15 cm.

Alto: 18 cm.

Desencofrante

Agente desencofrante de origen mineral, marca SikaDesencofrante-LN, que evita la adherencia del hormigón al encofrado, permitiendo así obtener una superficie de acabado optima y haciendo más fácil el desencofrado.

Compresor

Compresor de aire que se utiliza para ejercer una presión lo suficiente como para desmoldear las probetas cúbicas.

Depósito de curado

Deposito de la marca Ibertest de chapa galvanizada, provisto de una resistencia eléctrica y un termómetro para controlar la temperatura del agua así como de una bomba para recircular el agua del depósito.

Vibrador de hormigón

Vibrador marca Technoflex, Rabbit de 2300 watos, proporciona una mejor compactación del hormigón, eliminando las burbujas del mismo, proporcionando que el hormigón alcance una compactación superior, mayor dureza y una menor posibilidad de que en el hormigón aparezcan coqueas.

Moldes de probetas cúbicas

Siguen lo establecido por la Norma UNE-EN 12390-1:2013 (Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes), con unas dimensiones de 15 x 15 cm y un tapón en una de las caras para facilitar el desmolde de las probetas mediante el uso del compresor.

Moldes de probetas cilíndricas

Siguen lo establecido por la Norma UNE-EN 12390-1:2013 (Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y

moldes), con unas dimensiones de 15 x 30 cm. Estos moldes son metálicos por lo es necesario desmontarlos para desmoldar las probetas.

Báscula de plataforma

Báscula industrial con plataforma de acero inoxidable, con capacidad de hasta 600 Kg y resolución a partir de 10g. Incorpora un display con iluminación interna automática.

Cemento

En este caso se ha utilizado un cemento puzolánico resistente a los sulfatos, IV/A (V) 42,5 N/SR de la marca Cosmos.

Horno de azufre

Horno de azufre de la marca Ibertest.

Azufre en polvo

Azufre en polvo utilizado para refrentar las probetas cilíndricas.

Cubos o recipientes

Recipientes con la capacidad suficiente para cubrir la probeta por completo dentro del fluido contenido por dicho recipiente. El material de los mismos no puede ser atacado por agentes corrosivos, para no influir en el resultado del ensayo.

Sal

Sal común.

6.2.4 Proceso experimental.

6.2.4.1 Preparación de áridos.

Los áridos utilizados en la dosificación deben estar almacenados a una temperatura de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$, protegidos de los agentes atmosféricos para evitar la posibilidad de variaciones de las características de los mismos. Para este trabajo los áridos están almacenados en distintas sacas Big Bag, que facilitan la transpiración y así el secado de los áridos.

6.2.4.2 Amasado.

Para comenzar el amasado lo primero es pesar los áridos, el cemento, el agua y el material de sustitución que vayamos a emplear en cada amasada.

Se remueve el árido del interior del big bag, para evitar que existan variaciones del contenido de humedad de las muestras, y a continuación se tara el recipiente en el que se transportarán las cantidades de material.

Se trasvasa una cantidad al interior del recipiente y se pesa en la báscula. Para ajustar el peso del material en la báscula, se utiliza otro recipiente en donde se extrae o se añade más material del que se está pesando, en función de si se sobrepasa del peso marcado por la dosificación o por lo contrario no es suficiente.

Esto se realizara para cada árido necesario en cada una de las dosificaciones que vamos a utilizar.

En el caso del agua se utiliza un cubo con escala de volumen en litros, que además pesamos en la báscula para asegurarse de que la cantidad de líquido es la correcta.

Para el fluidificante la medición se realiza mediante el uso de una probeta ya que la cantidad de fluidificante que se utiliza es muy pequeña en comparación al resto de materiales.

Se dejan todos los recipientes con la cantidad necesaria para la dosificación cerca de la amasadora, y una vez que están preparadas las cantidades necesarias de cada material se procede a realizar la amasada.

Una vez encendida la amasadora se procede a realizar la mezcla, para la que se ha seguido una secuencia de árido más fino a más grueso, esperando un minuto entre vertido de cada tipo de árido, exceptuando entre la grava y el cemento que sólo se esperan 30 segundos. Primero se introduce la grava, después el cemento y posteriormente la arena gruesa. El material de sustitución se hecha con el árido al que sustituye, por lo que varía en cada una de las amasadas realizadas.

Por último se vierte el agua sobre la mezcla sin parar la amasadora y se espera 1 minuto hasta que se echa el fluidificante lentamente sobre el hormigón que se está amasando, hasta que adquiera una consistencia más fluida, lo que se puede apreciar a simple vista.



Figura 6.2.4.2.1. Ejemplo de amasada realizada.

6.2.4.3 Cono de Abrams.

Según la norma UNE-EN 12350-2:2009 (Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento), para efectuar este ensayo, el volumen de la muestra debe ser mayor a 8 litros y el ensayo debe efectuarse en un plazo menor a 3 minutos.

Se coloca el cono sobre la chapa base y se sujeta dicho molde con los pies mediante los agarres para los pies de los que dispone, y así evitamos cualquier posible movimiento del molde durante el ensayo.

Se llena con hormigón en 3 capas de igual volumen y se apisona cada capa con un número de golpes de varilla uniformemente repartidos.

En el apisonado de la última capa se debe mantener un exceso de hormigón sobre el borde superior del molde.

Se enrasa la superficie de la capa superior y se limpia el hormigón que se ha derramado. A continuación se levanta el mismo verticalmente y lentamente en un periodo de entre 5 y 10 segundos.

Se mide en el eje central del molde, comprobando en su posición original, la disminución de altura del hormigón con respecto a la altura del cono.

Si el hormigón se inclina bastante hacia un lado, sufre disgregaciones o cortes, se debe repetir el ensayo y si se presenta nuevamente el fenómeno, se considera que el

hormigón no es apto para efectuar el ensayo de asentamiento por no tener la plasticidad y cohesión necesaria.

La E.H.E determina las distintas consistencias y los valores límite de asentamiento del cono, en la siguiente tabla se muestran estos valores y consistencias.

Consistencia del hormigón	Aspecto	Asentamiento (cm)
Seca	Suelto y sin cohesión	0 a 2
Plástica	Levemente cohesivo	3 a 5
Blanda	Levemente fluido	6 a 9
Fluida	Fluido	10 a 15
Líquida	Muy Fluido	16 a 20

Tabla 6.2.4.3.1 Consistencia del hormigón en función del asentamiento del cono de Abrams.

Una vez se comprueba que la consistencia del hormigón es la deseada, se procede a preparar las probetas.

6.2.4.4 Preparación de probetas y vigas.

Probetas cúbicas y cilíndricas

Para la realización de este ensayo se han utilizado probetas cúbicas de 15 x 15 cm de arista y probetas cilíndricas de 15 x 30 cm, siguiendo lo especificado por la norma UNE-EN 12390-1:2013 (Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes.) la razón para hacer los dos tipos de probetas, es comprobar el coeficiente de conversión entre las probetas cúbicas y las cilíndricas.

Para preparar las probetas, primero se deben limpiar correctamente los respectivos moldes, asegurándose de que no queda ningún tipo de impureza por la cara interior del molde y de seguido se aplica una capa de desencofrante en el interior del molde para facilitar el desmolde de la probeta. Una vez realizadas estas tareas se puede proceder al llenado de los moldes.

Los moldes se llenan completamente de hormigón y a continuación se ha realizado un vibrado mediante el uso de un vibrador de hormigón para evitar posibles burbujas de aire en el interior de las probetas y posibles coqueas, de esta manera se mejoran las características de las probetas.

Por último se realiza el enrasado de las mismas con una llana o una paleta dejando la superficie lo más lisa posible. Se tapa la cara que queda al aire con un trapo húmedo y este se sujeta con una goma a la probeta, evitando que durante el proceso de fraguado el trapo no se mueva y quede expuesta la esta cara al aire.

Para este trabajo se han realizado dos series de probetas de 8 amasadas diferentes, procedentes de dos dosificaciones distintas necesarias para la investigación objeto de este trabajo.

La primera serie de probetas, perteneciente a la dosificación inicial (Serie A), está compuesta por 6 probetas cubicas y 2 probetas cilíndricas de cada amasada, en donde:

A1.i: Probetas curadas a 15 y 28 días y ensayadas tras dichos plazos.

A2.i: Probetas curadas 28 días según la normativa vigente y posteriormente conservadas al aire durante 8 meses.

A3.i: Probetas curadas 28 días según la normativa vigente y posteriormente conservadas en agua salada (4%) durante 8 meses.

La segunda serie de probetas (Serie B), pertenece a la segunda dosificación realizada junto con las vigas, está compuesta por 3 probetas cubicas de cada amasada, en donde:

B1.i: Probetas curadas 28 días y ensayadas tras dichos plazos.

Las probetas correspondientes a cada material se han nombrado en función del tipo de probeta y del número de serie de cada dosificación.

PROBETAS CUBICAS								
Material	Blanco	Hormigón reciclado	Cerámica	Loza	Escoria de soldadura	Viruta Larga	Viruta Corta	Granalla
Código de Probeta	A1.1b	A1.1hr	A1.1c	A1.1l	A1.1e	A1.1vl	A1.1vc	A1.1g
	A1.2b	A1.2hr	A1.2c	A1.2l	A1.2e	A1.2vl	A1.2vc	A1.2g
	A1.3b	A1.3hr	A1.3c	A1.3l	A1.3e	A1.3vl	A1.3vc	A1.3g
	A1.4b	A1.4hr	A1.4c	A1.4l	A1.4e	A1.4vl	A1.4vc	A1.4g
	A2.1b	A2.1hr	A2.1c	A2.1l	A2.1e	-	-	-
	A3.1b	A3.1hr	A3.1c	A3.1l	A3.1e	-	-	-
	B1.1b	B1.1hr	B1.1c	B1.1l	B1.1e	-	B1.1vc	B1.1g
	B1.2b	B1.2hr	B1.2c	B1.2l	B1.2e	-	B1.2vc	B1.2g
	B1.3b	B1.3hr	B1.3c	B1.3l	B1.3e	-	B1.3vc	B1.3g

Tabla 6.2.4.4.1. Tabla de probetas cubicas.

PROBETAS CILINDRICAS								
Material	Blanco	Hormigón reciclado	Cerámica	Loza	Escoria de soldadura	Viruta Larga	Viruta Corta	Granalla
Código de Probeta	A1.1b	A1.1hr	A1.1c	A1.1l	A1.1e	A1.1vl	A1.1vc	A1.1g
	A1.2b	A1.2hr	A1.2c	A1.2l	A1.2e	A1.2vl	A1.2vc	A1.2g

Tabla 6.2.4.4.2. Tabla de probetas cilíndricas.

NOTA: El hormigón nombrado como “blanco” es el hormigón sin sustitución que utilizamos como referencia para el estudio.

En la primera fase del estudio se hicieron solo proveas cubicas y cilíndricas y se comprobaron sus propiedades de trabajabilidad y resistencia comparadas con las de hormigón en blanco.

Vigas

En el caso de las vigas primero se debe montar el encofrado, que consta de 4 piezas que se unen mediante tornillos. Se coloca el molde sobre una superficie perfectamente plana que se protege mediante un plástico y a continuación se le aplica desencofrante a toda la zona interior del encofrado para facilitar el desmolde de la viga.

Una vez montado el encofrado, se prepara la armadura, para lo que es necesario añadirle los separadores que harán que se guarde el recubrimiento que se ha establecido, y colocar los elementos auxiliares de izado, unas horquillas metálicas que permitirá mover las vigas con el puente grúa.

Una vez realizado este proceso, se coloca la armadura dentro del molde asegurándose de que encaja perfectamente en el encofrado y de que los separadores cumplen su función. A continuación se llena el encofrado de hormigón en varias fases de igual proporción, parándose a vibrar cada una de las capas mediante el uso de un vibrador de hormigón.



Figura 6.2.4.4.1. Viga después de vibrado.

Se deja en la cara superior de la viga una o dos huellas en los lugares donde se van a aplicar las fuerzas en los apoyos.

Una vez que las vigas se han curado, se debe aplicar mortero autonivelante en las zonas en las que se apoyarán los elementos auxiliares necesarios para la realización del ensayo. Esto se debe a que la superficie de contacto de la viga es irregular, y estas irregularidades, puedan falsear los resultados del ensayo.



Figura 6.2.4.4.2. Viga desencofrada objeto del trabajo.

Para la segunda parte de este trabajo se han realizado 7 amasadas, descartando la amasada realizada para el ensayo de las probetas que contenía viruta larga debido a la mala trabajabilidad de esta. De cada amasada se han obtenido una viga y tres probetas cúbicas, debido a que en estas amasadas se modificó la dosificación de la fase 1.

Los planos de las vigas y de las armaduras que se han utilizado se pueden observar en los planos adjuntos al final de este trabajo.

6.2.4.5 Curado de probetas y vigas.

Para obtener un correcto fraguado y primer periodo de endurecimiento del hormigón se debe asegurar un perfecto curado de las probetas, lo que proporcionará unas buenas características al hormigón y se corresponderá con lo buscado en la dosificación. Teniendo en cuenta esto, el proceso de curado debe de cumplir con lo siguiente:

- Las probetas permanecerán 24 horas en el laboratorio a una temperatura de 20 ± 5 grados, con su lado externo tapado con un trapo húmedo y protegidas por una bolsa de plástico para que no haya un exceso de evaporación del agua.
- Una vez cumplidas las 24 horas, las probetas se desmoldan introduciendo aire a presión por el tapón que tenía el molde en su base inferior. A continuación se eliminan las posibles rebabas que tengan las probetas con una espátula y se identifican con el nombre y la fecha de la amasada.

- Desmoldada toda la serie de probetas de la misma amasada, se introducen en un depósito de curado a una temperatura de 20 ± 2 grados, asegurando un 95% de humedad. El depósito de curado está provisto de una bomba para recircular el agua, lo que nos permite cumplir perfectamente las condiciones de curado exigidas por la EHE-08.

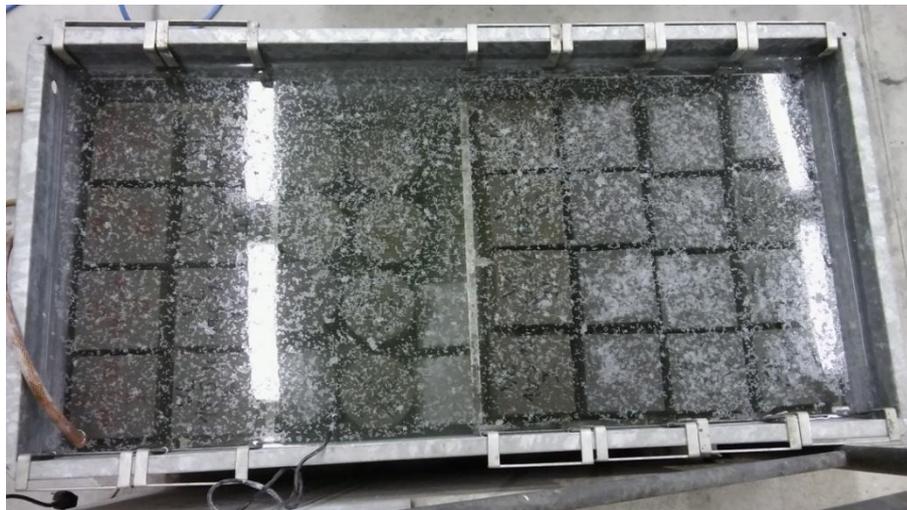


Figura 6.2.4.5.1. Probetas en depósito de curado.

Es importante limpiar correctamente los moldes después de realizar el desmoldeo, para conservarlos en buenas condiciones para su próxima utilización.

Para el caso de las vigas el proceso es el mismo, salvo que a la hora de desmoldarlas, el encofrado se desmontará mediante la sustracción de los tornillos que lo mantienen unido, y el curado que se hace al aire.

6.2.4.6 Refrentado de probetas cilíndricas.

En el caso de las probetas cilíndricas tendremos que hacer un paso más antes de realizar el ensayo a compresión.

Las probetas cilíndricas al contrario que las cubicas carecen de dos caras enfrentadas y planas que se necesitan para el ensayo de compresión por lo que es necesario refrentar la cara superior que ha curado al aire, ya que esta cara no queda lo suficientemente lisa.

Teniendo en cuenta esto, el proceso de refrentado debe de cumplir con lo siguiente:

- Antes de refrentar, la superficie de la probeta debe estar seca., limpia y deben retirarse toda clase de partículas sueltas.

- El refrentado debe ser tan fino como sea posible y no debe tener más de 5 mm de grosor, aunque pueden permitirse pequeñas desviaciones locales.
- El material de refrentado puede consistir de una mezcla compuesta en partes iguales en peso de azufre y arena silíceo fina (la mayor parte que pase por el tamiz de 250 μm y que sea retenida por el tamiz de 125 μm conforme a la Norma ISO 3310-1).
- La mezcla debe calentarse a la temperatura recomendada por el suministrador o a una temperatura tal, que mientras se remueve continuamente, se alcance la consistencia requerida.



Figura 6.2.4.6.1. Horno para calentar el azufre.

- La mezcla se remueve continuamente para asegurar su homogeneidad y para impedir que se formen sedimentos en el fondo del recipiente de fundir.
- Se coge un cazo de la mezcla líquida y caliente y se vierte sobre el plato de refrentado.
- Se coloca en la cara superior de la probeta, en el plato horizontal que contiene la mezcla de azufre fundida. Se deja que la mezcla se endurezca antes de retirar la probeta. Se utiliza un equipo de refrentado que asegure que las dos caras queden paralelas y se utiliza desencofrante para retirar de forma más fácil la probeta refrentada.



Figura 6.2.4.6.2. Equipo de refrentado.

- Se debe inspeccionar la probeta para asegurarse de que el material refrentado se ha adherido perfectamente. Si la capa de refrentado suena a hueco, debe eliminarse y refrentarse de nuevo. El ensayo de compresión no debe efectuarse hasta que hayan transcurrido al menos 30 min desde la operación de refrentado.



Figura 6.2.4.6.3. Refrentado en probetas.

6.3 ENSAYOS DE PROBETAS A COMPRESIÓN.

6.3.1 Introducción.

El objetivo del ensayo, es determinar la máxima carga alcanzada por las probetas, sometiéndolas a rotura por compresión en una máquina conforme a la Norma UNE-EN 12390-4 (Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión.

Características de las máquinas de ensayo), y así calcular la resistencia a compresión del hormigón.

6.3.2 Probetas curadas en depósito.

6.3.2.1 Introducción.

Para este trabajo se han utilizado probetas de hormigón cubicas y cilíndricas sin haber sido sometidas a procesos de corrosión ni ningún otro tipo de proceso que las pudiese alterar. Se han fabricado dos series de probetas con los distintos tipos de materiales de sustitución que se han utilizado en la amasada, comparando estas series con una amasada en blanco (sin sustitución).

Se ha realizado una primera dosificación para las probetas de la serie A obteniendo los primeros resultados en cuanto a la resistencia de las probetas con los distintos materiales. Una vez obtenidos los primeros datos de la resistencia de las probetas y valorando los resultados obtenidos se calculo otra dosificación para realizar las amasadas de la serie B de probetas.

6.3.2.2 Normativa.

Ministerio de Fomento, 2008a. Instrucción para la recepción de cementos RC-08. Ministerio de Fomento.

Ministerio de Fomento, 2008b. Instrucción de hormigón estructural EHE-08. Ministerio de Fomento.

UNE-EN 197-1, "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes". Diciembre 2011: MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-1, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes". Agosto 2013. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-3, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas". Diciembre 2011. MADRID AENOR

UNE-EN 12390-4, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo". Enero 2001. MADRID: AENOR

6.3.2.3 Infraestructura, materiales y equipos.

Máquina de ensayo para materiales de alta resistencia a la compresión

Máquina de ensayos de compresión, modelo “Ibertest MEH 3000 SW de 2009”, cuyo funcionamiento es mediante un sistema hidráulico que utiliza probetas normalizadas.

Para la obtención gráfica de los resultados se utiliza un sistema informático que reproduce la fuerza que aplica el pistón hidráulico sobre la probeta.

6.3.2.4 Preparación del ensayo.

Para este trabajo se ensayaron probetas a 15 y a 28 días de curado todas a compresión, tanto cubicas como cilíndricas.

	Probetas ensayadas a 15 días	Probetas ensayadas a 28 días	
	Cubicas	Cubicas	Cilíndricas
Blanco	A1.1b	A1.2b, A1.3b, A1.4b, B1.1b, B1.2b, B1.3b	A1.1b, A1.2b
Hormigón reciclado	A1.1hr	A1.2hr, A1.3hr, A1.4hr, B1.1hr, B1.2hr, B1.3hr	A1.1hr, A1.2hr
Cerámico	A1.1c	A1.2c, A1.3c, A1.4c, B1.1c, B1.2c, B1.3c	A1.1c, A1.2c
Loza	A1.1l	A1.2l, A1.3l, A1.4l, B1.1l, B1.2l, B1.3l	A1.1l, A1.2l
Escoria de soldadura	A1.1e	A1.2e, A1.3e, A1.4e, B1.1e, B1.2e, B1.3e	A1.1e, A1.2e
Viruta larga	A1.1vl	A1.2vl, A1.3vl, A1.4vl, B1.1vl, B1.2vl, B1.3vl	A1.1vl, A1.2vl
Viruta corta	A1.1vc	A1.2vc, A1.3vc, A1.4vc, B1.1vc, B1.2vc, B1.3vc	A1.1vc, A1.2vc
Granalla	A1.1g	A1.2g, A1.3g, A1.4g, B1.1g, B1.2g, B1.3g	A1.1g, A1.2g

Tabla 6.3.2.4.1. Tabla de número de serie de probetas ensayadas a 15 y 28 días de las series A y B.

En el Anexo 1 se puede apreciar de manera más detallada las fechas de los ensayos, así como el tiempo transcurrido para cada probeta desde que se desmolda hasta el momento de su ensayo a compresión.

6.3.2.5 Ejecución del ensayo.

Según la Norma UNE-EN 12390-3:2011. (Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas), el proceso para realizar el ensayo a compresión debe cumplir con los siguientes puntos:

- Al introducir una probeta en la máquina de ensayo, se limpiarán las superficies que estarán en contacto con la probeta, asegurándose de que no queda ningún resto de hormigón o gravilla de ensayos anteriores que puedan falsear los resultados de las probetas que se van a ensayar.
- Para colocar las probetas dentro de la máquina de ensayo a compresión, sólo se utilizarán los propios suplementos de la maquina que sigan lo establecido en la UNE-EN 12390-4:2013 (Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo).
- Antes de realizar el ensayo, se debe secar el exceso de humedad de las probetas.
- Se introduce la probeta en la máquina de ensayo a compresión, asegurándose de que está perfectamente centrada y de que las caras en contacto con el pistón y la base sean perfectamente lisas.



Figura 6.3.2.5.1 Colocación de las probetas dentro de la máquina.

- Una vez colocada la probeta en la maquina, se accede al software del que está dotado esta para realizar el ensayo. Dentro del programa se identificara el tipo

de probeta, dimensiones, tiempo de curado y el tipo de ensayo que se quiere realizar.

- Introducidos todos los parámetros se procede a la realización del ensayo mediante el accionamiento del pistón. En este caso, el equipo establece automáticamente la velocidad óptima de descenso del pistón.

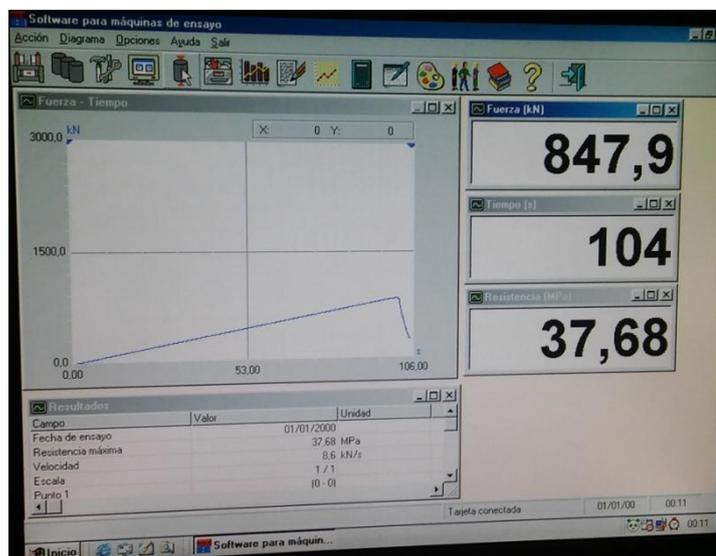


Figura 6.3.2.5.2. Software utilizado para la realización de los ensayos.

El ensayo termina cuando la probeta sufre rotura y ya no puede soportar más carga.

El propio software de la máquina registra la carga máxima indicada en kN, así como el tiempo y la resistencia indicada en Mpa, siendo esto último lo más interesante para este trabajo. El software también nos muestra una gráfica de la variación de la fuerza que ejerce el pistón sobre la probeta durante el paso del tiempo del ensayo y el punto de rotura de la probeta.

A continuación se muestran los tipos de rotura que se consideran satisfactorias según la Norma UNE-EN 12390-3:2011, tanto para probetas cúbicas como cilíndricas.

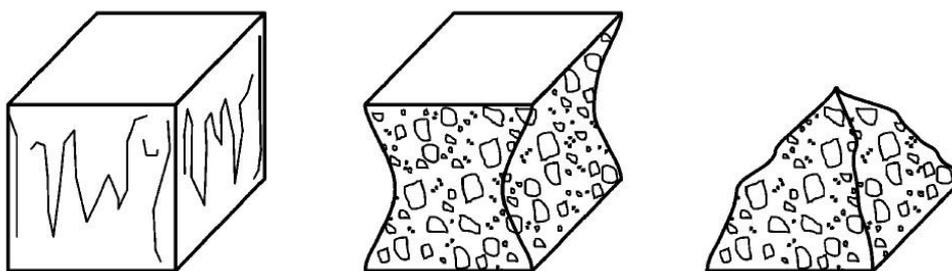


Figura 6.3.2.5.3 Tipos de roturas satisfactorias en probetas cúbicas de hormigón.

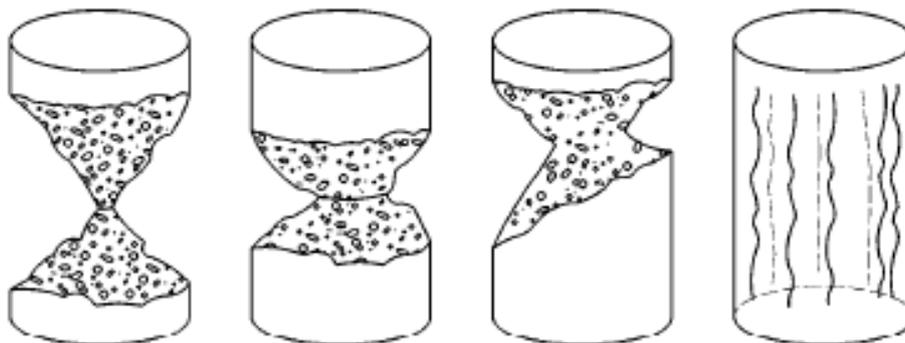


Figura 6.3.2.5.4 Tipos de roturas satisfactorias en probetas cilíndricas de hormigón.

Estos tipos de roturas satisfactorios, coinciden con todos los ensayos realizados durante la realización del trabajo.



Figura 6.3.2.5.5 Probeta después de realizar el ensayo a compresión.

6.3.3 Probetas conservadas al aire durante 8 meses.

6.3.3.1 Introducción.

Se han utilizado probetas cúbicas de hormigón de la serie A conservadas al aire durante 8 meses sin haber sido sometidas a procesos de corrosión ni ningún otro tipo de proceso que las pudiese alterar. Se ha fabricado una probeta según el tipo de material de sustitución que se ha utilizado en la amasada, comparando estas con una amasada en blanco.

6.3.3.2 Normativa.

Ministerio de Fomento, 2008a. Instrucción para la recepción de cementos RC-08. Ministerio de Fomento.

Ministerio de Fomento, 2008b. Instrucción de hormigón estructural EHE-08. Ministerio de Fomento.

UNE-EN 197-1, "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes". Diciembre 2011: MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-1, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes". Agosto 2013. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-3, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas". Diciembre 2011. MADRID AENOR

UNE-EN 12390-4, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo". Enero 2001. MADRID: AENOR

6.3.3.3 Infraestructura, materiales y equipos.

Máquina de ensayo para materiales de alta resistencia a la compresión

Máquina de ensayos de compresión, modelo "Ibertest MEH 3000 SW de 2009", cuyo funcionamiento es mediante un sistema hidráulico y utiliza probetas normalizadas.

Para la obtención gráfica de los resultados se utiliza un sistema informático que reproduce la fuerza que aplica el pistón hidráulico sobre la probeta.

6.3.3.4 Preparación del ensayo.

Para este trabajo se ensayaron probetas a 28 días de curado y conservadas al aire durante 8 meses todas a compresión.

Probetas ensayadas a 8 meses	
Cubicas	
Conservadas al aire	
Blanco	A2.1b
Hormigón reciclado	A2.1hr
Cerámico	A2.1c
Loza	A2.1l
Escoria de soldadura	A2.1e

Tabla 6.3.3.4.1. Tabla de número de serie de probetas conservadas al aire.

En el Anexo 1 se puede apreciar de manera más detallada las fechas de los ensayos, así como el tiempo transcurrido para cada probeta desde que se desmolda hasta el momento de su ensayo a compresión.

6.3.3.5 Ejecución del ensayo.

Según la Norma UNE-EN 12390-3:2011. (Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas), el proceso para realizar el ensayo a compresión debe cumplir con los siguientes puntos:

- Al introducir una probeta en la máquina de ensayo, se limpiarán las superficies que estarán en contacto con la probeta, asegurándose de que no queda ningún resto de hormigón o gravilla de ensayos anteriores que puedan falsear los resultados de las probetas que se van a ensayar.
- Para colocar las probetas dentro de la máquina de ensayo a compresión, sólo se utilizarán los propios suplementos de la maquina que sigan lo establecido en la UNE-EN 12390-4:2013 (Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo).
- Antes de realizar el ensayo, se debe secar el exceso de humedad de las probetas.
- Se introduce la probeta en la máquina de ensayo a compresión, asegurándose de que está perfectamente centrada y de que las caras en contacto con el pistón y la base sean perfectamente lisas.
- Una vez colocada la probeta en la maquina, se accede al software del que está dotado esta para realizar el ensayo. Dentro del programa se identificara el tipo de probeta, dimensiones, tiempo de curado y el tipo de ensayo que se quiere realizar.
- Introducidos todos los parámetros se procede a la realización del ensayo mediante el accionamiento del pistón. En este caso, el equipo establece automáticamente la velocidad óptima de descenso del pistón.

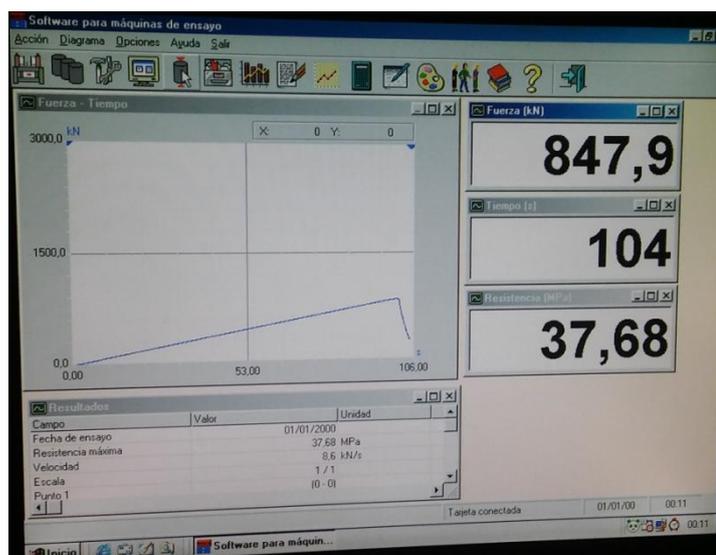


Figura 6.3.3.5.1. Software utilizado para la realización de los ensayos.

El ensayo termina cuando la probeta sufre rotura y ya no puede soportar más carga.

El propio software de la máquina registra la carga máxima indicada en kN, así como el tiempo y la resistencia indicada en Mpa, siendo esto último lo más interesante para este trabajo. El software también nos muestra una gráfica de la variación de la fuerza que ejerce el pistón sobre la probeta durante el paso del tiempo del ensayo y el punto de rotura de la probeta.

A continuación se muestran los tipos de rotura que se consideran satisfactorias según la Norma UNE-EN 12390-3:2011, tanto para probetas cúbicas como cilíndricas.

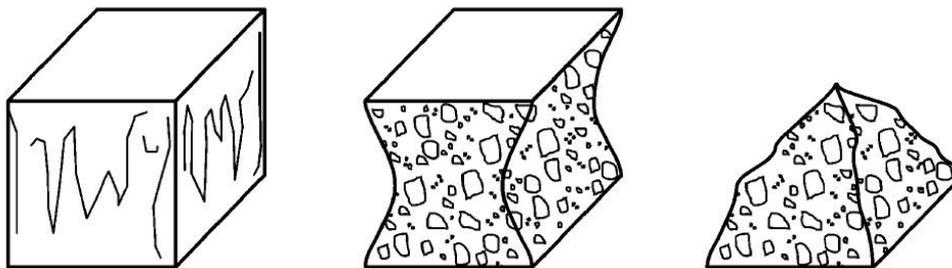


Figura 6.3.2.5.3 Tipos de roturas satisfactorias en probetas cúbicas de hormigón.

Estos tipos de roturas satisfactorios, coinciden con todos los ensayos realizados durante la realización del trabajo.



Figura 6.3.3.5.4 Probeta después de realizar el ensayo a compresión.

6.3.4 Probetas conservadas en agua salada durante 8 meses.

6.3.4.1 Introducción.

Se han utilizado probetas cúbicas de hormigón de la serie A conservadas en agua salada durante 8 meses sin haber sido sometidas a procesos de corrosión ni ningún otro tipo de proceso que las pudiese alterar. Se ha fabricado una probeta según el tipo de material de sustitución que se ha utilizado en la amasada, comparando estas con una amasada en blanco.

6.3.4.2 Normativa.

Ministerio de Fomento, 2008a. Instrucción para la recepción de cementos RC-08. Ministerio de Fomento.

Ministerio de Fomento, 2008b. Instrucción de hormigón estructural EHE-08. Ministerio de Fomento.

UNE-EN 197-1, "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes". Diciembre 2011: MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-1, "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes". Agosto 2013. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-3, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”. Diciembre 2011. MADRID AENOR

UNE-EN 12390-4, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo”. Enero 2001. MADRID: AENOR

6.3.4.3 Infraestructura, materiales y equipos.

Máquina de ensayo para materiales de alta resistencia a la compresión

Máquina de ensayos de compresión, modelo “Ibertest MEH 3000 SW de 2009”, cuyo funcionamiento es mediante un sistema hidráulico y utiliza probetas normalizadas.

Para la obtención gráfica de los resultados se utiliza un sistema informático que reproduce la fuerza que aplica el pistón hidráulico sobre la probeta.

6.3.4.4 Preparación del ensayo.

Para este trabajo se ensayaron probetas a 28 días de curado y conservadas en agua salada durante 8 meses a compresión.

Probetas ensayadas a 8 meses	
Cubicas	
Conservadas en agua salada	
Blanco	A3.1b
Hormigón reciclado	A3.1hr
Cerámico	A3.1c
Loza	A3.1l
Escoria de soldadura	A3.1e

Tabla 6.3.4.4.1. Tabla de número de serie de probetas conservadas en agua salada.

En el Anexo 1 se puede apreciar de manera más detallada las fechas de los ensayos, así como el tiempo transcurrido para cada probeta desde que se desmolda hasta el momento de su ensayo a compresión.

6.3.4.5 Ejecución del ensayo.

Según la Norma UNE-EN 12390-3:2011. (Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas), el proceso para realizar el ensayo a compresión debe cumplir con los siguientes puntos:

- Al introducir una probeta en la máquina de ensayo, se limpiaran las superficies que estarán en contacto con la probeta, asegurándose de que no queda ningún resto de hormigón o gravilla de ensayos anteriores que puedan falsear los resultados de las probetas que se van a ensayar.
- Para colocar las probetas dentro de la máquina de ensayo a compresión, sólo se utilizarán los propios suplementos de la maquina que sigan lo establecido en la UNE-EN 12390-4:2013 (Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo).
- Antes de realizar el ensayo, se debe secar el exceso de humedad de las probetas.
- Se introduce la probeta en la máquina de ensayo a compresión, asegurándose de que está perfectamente centrada y de que las caras en contacto con el pistón y la base sean perfectamente lisas.
- Una vez colocada la probeta en la maquina, se accede al software del que está dotado esta para realizar el ensayo. Dentro del programa se identificara el tipo de probeta, dimensiones, tiempo de curado y el tipo de ensayo que se quiere realizar. Introducidos todos los parámetros se procede a la realización del ensayo mediante el accionamiento del pistón. En este caso, el equipo establece automáticamente la velocidad óptima de descenso del pistón.

El ensayo termina cuando la probeta sufre rotura y ya no puede soportar más carga.

El propio software de la máquina registra la carga máxima indicada en kN, así como el tiempo y la resistencia indicada en Mpa, siendo esto último lo más interesante para este trabajo. El software también nos muestra una gráfica de la variación de la fuerza

que ejerce el pistón sobre la probeta durante el paso del tiempo del ensayo y el punto de rotura de la probeta.

A continuación se muestran los tipos de rotura que se consideran satisfactorias según la Norma UNE-EN 12390-3:2011, tanto para probetas cúbicas como cilíndricas.

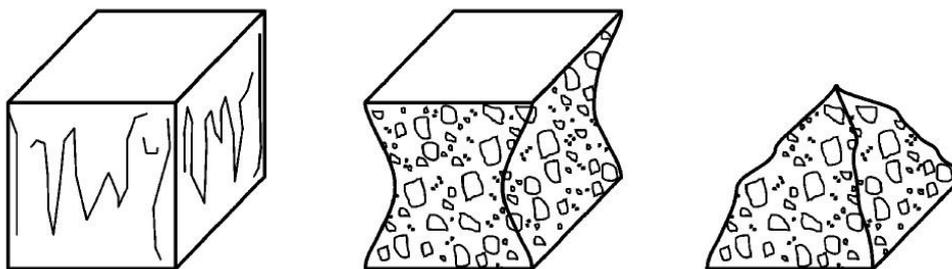


Figura 6.3.4.5.1 Tipos de roturas satisfactorias en probetas cúbicas de hormigón.

Estos tipos de roturas satisfactorios, coinciden con todos los ensayos realizados durante la realización del trabajo.



Figura 6.3.4.5.2 Probeta después de realizar el ensayo a compresión.

6.4 ENSAYOS DE VIGAS.

6.4.1 Introducción.

El objetivo de estas pruebas es observar y analizar el comportamiento de las vigas, sometidas a flexión y cortante, desde que se comienzan a cargar hasta que se produce el colapso. Para ello se emplea un pórtico dotado de un pistón hidráulico, con

una capacidad de carga máxima de 30 toneladas capaz de someter a rotura vigas y pilares cortos.

Las vigas se han realizado utilizando la segunda dosificación que se realizó para este trabajo, teniendo así la misma dosificación que las probetas de la serie B.

6.4.2 Vigas conservadas al aire.

6.4.2.1 Introducción.

Estas vigas se conservan al aire sin haber sido sometidas a procesos de corrosión ni ningún otro tipo de proceso que las pudiese alterar.

6.4.2.2 Normativa.

Ministerio de Fomento, 2008a. Instrucción para la recepción de cementos RC-08.

Ministerio de Fomento.

Ministerio de Fomento, 2008b. Instrucción de hormigón estructural EHE-08.

Ministerio de Fomento.

UNE-EN 197-1, "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes". Diciembre 2011: MADRID: AENOR

6.4.2.3 Infraestructura, materiales y equipos.

Pórtico

Pórtico ensayos para vigas y pilares cortos con estructura metálica y sistema hidráulico que permiten una carga máxima de 30 toneladas, con capacidad para regular la velocidad de bajada del pistón.

La estructura ha sido proyectada y calculada por los profesores del área de Ingeniería de la Construcción de esta escuela, y ha sido fabricada por Aceriusa S.L. La concepción del sistema hidráulico, así como su ensamblaje e integración han sido realizados en colaboración por dichos profesores y por los técnicos de la empresa Fluid-Control S.A. El pórtico está dimensionado de modo que sus deformaciones son despreciables para la carga máxima ya comentada. La velocidad máxima de descenso del pistón es de 0,4 mm/seg. A su vez, para un ensayo determinado, la velocidad de descenso del pistón puede regularse desde el 0% hasta el 100% de dicha velocidad.

Pie de rey electrónico

El pie de rey dispone de dos puntas para el control de las mediciones interiores y exteriores. Dotado con una pantalla digital, asegurando un proceso de medición directo, rápido y preciso.

Puente grúa

Puente grúa marca Jaso, con una capacidad máxima de 10 toneladas de carga.

Eslingas

Eslingas tubulares de 5 metros con capacidad de carga de 5 toneladas.

6.4.2.4 Preparación del ensayo.

Para determinar las deformaciones que se producen en las caras laterales de las vigas se ha realizado un cuadrículado lateral en las vigas de modo que las intersecciones de dicha cuadrícula estén a una distancia de 50 mm. La línea inferior se encuentra a una distancia 24 mm de la base de la viga, siendo este el centro de gravedad de la sección de la armadura inferior.



Figura 6.4.2.4.1. Viga preparada en el pórtico.

Se colocara correctamente centrada la viga dentro del pórtico de ensayo, sobre dos apoyos articulados.

En la cara superior de la viga se colocan en las zonas de aplicación de cargas, en las cuales se ha aplicado mortero autonivelante, otros dos apoyos articulados. Sobre estos se coloca una viga metálica, que reparte la carga ejercida por el pistón entre ambas zonas de aplicación de las cargas.

Esta viga metálica está dimensionada de manera que sus deformaciones son despreciables para la carga máxima del pórtico.

Es muy importante que los apoyos articulados queden perfectamente apoyados sobre la viga, de modo que no exista ningún tipo de holgura ni balanceo de los mismos mientras se ejecute el ensayo. Esto podría falsear los resultados, por lo que el acabado de las zonas en las que se ha aplicado mortero autonivelante debe ser liso y horizontal.

A continuación se escoge una velocidad de descenso del pistón adecuada para el ensayo. No existe ninguna normativa al respecto, pero la velocidad debe ser muy reducida para facilitar las oportunas observaciones y mediciones.

Se ha empleado una velocidad del 10% de la máxima (0,2 mm/seg) en los primeros momentos de carga de la viga, subiendo esta velocidad al 20% cuando se estancaba la carga y al 30% cuando la viga esté cerca del colapso. El pistón debe avanzar a la misma velocidad todo el tiempo que esté en movimiento, a excepción de los momentos en que se realicen paradas para efectuar mediciones sobre la viga.

Si se utilizan cámaras para fotografiar el ensayo, estas se deben colocar lo más cerca posible de la viga y siempre de forma paralela a esta, de modo que no se falseen las distancias en el posterior análisis de imágenes mediante el software adecuado. Las cámaras no deben moverse en ningún momento del ensayo.

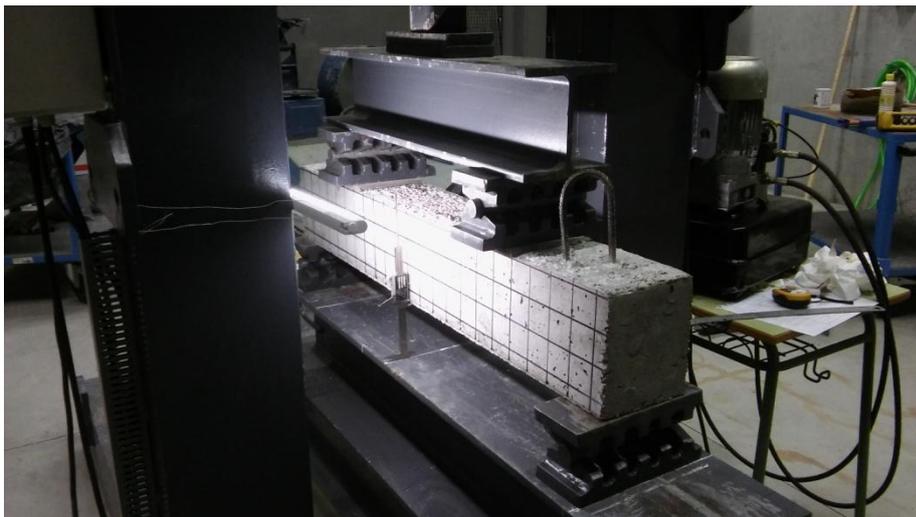


Figura 6.4.2.4.2. Montaje para la realización del ensayo.

6.4.2.5 Proceso experimental.

Las vigas se ha ido cargando progresivamente a la velocidad anteriormente descrita, realizándose paradas para mediciones a 1, 1.5, 2, 3 (carga de cálculo), 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 8.5, 9 y Q toneladas, siendo Q la carga máxima que finalmente resistió la estructura en función de sus características reales (dimensiones, armado y por tanto, de la resistencia característica f_{ck} real establecida por medio de los resultados de los ensayos de probetas a 28 días.

Se acciona el mecanismo para el avance del pistón a la velocidad escogida hasta que el indicador de carga marque 1 tonelada, se selecciona una velocidad nula para el avance del pistón, de modo que se puedan realizar mediciones sobre la viga sin que existan variaciones.

A continuación se comprueba si ha aparecido alguna fisura y en caso afirmativo se realiza una marca al lado de la misma para registrar la aparición de dicha fisura. Se toma nota de la aparición de la primera fisura para poder saber con qué carga apareció esta.

Además, se mide lo siguiente:

- Mediante un calibre de pie de rey:
 - Altura máxima de fisuras.
 - Anchura máxima de fisuras.
 - Flecha.

Se realizan fotografías con dos cámaras situadas una a cada lado de la columna del pórtico. Durante la realización de las paradas se incluye un rótulo que indica la carga a la cual corresponden las fotos de dicha parada.



Figura 6.4.2.4.3. Viga con el rótulo de la carga correspondiente.

Para realizar el seguimiento de los resultados obtenidos en cada parada, se han apuntado los datos obtenidos en cada medición requeridos por el ensayo que realizamos.

El proceso de medición se repite para todas las cargas anteriormente descritas hasta llegar a la carga máxima.



Figura 6.4.2.4.4. Viga durante el ensayo con las fisuras marcadas y con una flecha significativa.

Una vez llegado a la carga de Q toneladas, se aumenta la velocidad del pistón al 30% hasta el colapso total de la viga, y por tanto la rotura de la cabeza de compresión.

7. RESULTADOS.

7.1 RESULTADOS DE ENSAYOS DE PROBETAS A COMPRESIÓN.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de las probetas a 15 y 28 días de curado, tanto de las probetas cúbicas como de las probetas cilíndricas y las probetas conservadas durante 8 meses.

En los ensayos se han utilizado probetas y vigas de dos dosificaciones distintas. Para el primer ensayo se utilizaron probetas cúbicas y cilíndricas de la serie A que pertenecen a la primera dosificación.

En el segundo ensayo se utilizaron vigas y probetas cúbicas de la serie B siendo estas de la segunda dosificación utilizada.

7.1.1 Probetas con 15 días de curado.

Este apartado incluye los resultados del ensayo a compresión de las probetas cúbicas de hormigón con 15 días de curado, contados a partir de la fecha de amasada. Estas probetas corresponden a la serie A realizada con la primera dosificación.

CUBICAS	Código de Probeta	Fuerza (kN)	Tiempo (seg)	Resistencia (Mpa)
Blanco	A1.1b	959,8	116	42,66
Hormigón reciclado	A1.1hr	934,8	114	41,55
Cerámica	A1.1c	884,7	110	39,32
Loza	A1.1l	829,4	103	36,86
Escoria de soldadura	A1.1e	1076,1	129	47,83
Viruta larga	A1.1vl	915,5	119	43,36
Viruta corta	A1.1vc	1043,4	127	46,37
Granalla	A1.1g	1061,8	127	47,19

Tabla 7.1.1.1 Resistencia a compresión de las probetas con 15 días de curado.

En la siguiente gráfica se puede apreciar que la resistencia a compresión de las probetas, experimentan una variación en función del tipo de material de sustitución empleado en la amasada.

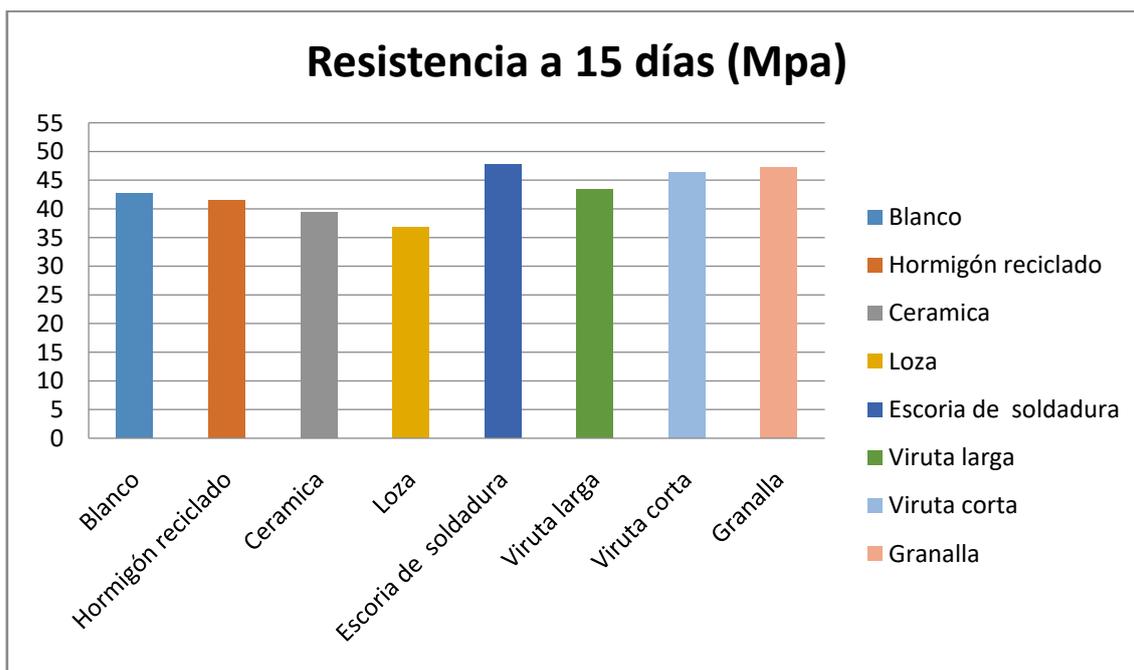


Figura 7.1.1.1 Grafico de la resistencia a compresión en Mpa de las probetas con 15 días de curado.

Estos resultados no son concluyentes a la hora de determinar la resistencia de las probetas. Se determino que a 15 días de curado se realizara un ensayo a compresión con una probeta de cada amasada, y así asegurarnos de que el curado se estaba realizando de forma correcta.

A continuación se muestran los resultados de las probetas a 28 días de curado, siendo éstos los que determinaran la resistencia a compresión de las probetas.

7.1.2 Probetas con 28 días de curado.

Este apartado incluye los resultados del ensayo a compresión de las probetas cubicas y cilíndricas de hormigón con 28 días de curado, contados a partir de la fecha de amasada.

7.1.2.1 Probetas correspondientes a la serie A raizadas con la primera dosificación.

CUBICAS	Código de Probeta	Fuerza (kN)	Tiempo(seg)	Resistencia (Mpa)	Recorrido relativo (<=20%)
Blanco	A1.2b	1053	127	46,84	3%
	A1.3b	1019,6	124	45,31	
	A1.4hr	1049,4	128	46,64	
Hormigón reciclado	A1.2hr	1006,4	122	49,73	12%
	A1.3hr	1006,5	121	44,73	
	A1.4c	995,4	121	44,24	

Cerámica	A1.2c	978	119	43,47	5%
	A1.3c	1024,9	124	45,55	
	A1.4c	1006,8	123	44,74	
Loza	A1.2l	948	115	42,13	4%
	A1.3l	932,3	113	41,43	
	A1.4l	966	117	42,93	
Escoria de soldadura	A1.2e	1201,3	143	53,39	3%
	A1.3e	1188	142	52,8	
	A1.4e	1167,7	141	51,9	
Viruta larga	A1.2vl	1027,1	130	45,64	7%
	A1.3vl	1084	131	48,18	
	A1.4vl	1099,6	132	48,87	
Viruta corta	A1.2vc	1117,1	136	49,65	6%
	A1.3vc	1160,4	139	51,57	
	A1.4vc	1187,2	143	52,76	
Granalla	A1.2g	1235,2	148	54,9	2%
	A1.3g	1205,2	144	53,56	
	A1.4g	1226	146	54,49	

Tabla 7.1.2.1.1 Resistencia a compresión de las probetas cúbicas con 28 días de curado de la serie A.

CILINDRICAS	Código de Probeta	Fuerza (kN)	Tiempo(seg)	Resistencia (Mpa)	Recorrido relativo (<13%)
Blanco	A1.1b	781,7	93	44,23	4%
	A1.2b	750,6	89	42,47	
Hormigón reciclado	A1.1hr	745,4	88	42,18	11%
	A1.2hr	668,7	81	37,84	
Cerámica	A1.1c	659,3	79	37,31	10%
	A1.2c	727,6	87	41,18	
Loza	A1.1l	708,1	84	40,07	2%
	A1.2l	720,9	86	40,79	
Escoria de soldadura	A1.1e	829,8	98	46,96	1%
	A1.2e	824,1	98	46,63	
Viruta larga	A1.1vl	788,8	94	44,64	2%
	A1.2vl	808,6	96	45,76	
Viruta corta	A1.1vc	818,7	97	46,33	2%
	A1.2vc	805,3	96	45,57	
Granalla	A1.1g	712,1	86	40,29	17%
	A1.2g	846,9	100	47,93	

Tabla 7.1.2.1.2 Resistencia a compresión de las probetas cilíndricas con 28 días de curado de la serie A.

La instrucción EHE-08 establece la aplicación de un factor de conservación de los resultados de probetas cúbicas para su expresión equivalente a probetas cilíndricas, de 0.9, si $f_c < 60$ Mpa, que es nuestro. En las tablas 7.1.2.1.1 y 7.1.2.1.2 pueden observarse que en este caso dicho factor es conservador, y por tanto se puede usar para estos materiales.

7.1.2.2 Probetas correspondientes a la serie B realizadas con la segunda dosificación.

En los segundos ensayos con probetas, la viruta larga se excluyó como material de sustitución por la mala trabajabilidad que tenía este material.

CUBICAS	Código de Probeta	Fuerza (kN)	Tiempo(seg)	Resistencia (Mpa)	Recorrido relativo ($\leq 20\%$)
Blanco	B1.1b	847,8	101	37,68	5%
	B1.2b	870,3	104	38,68	
	B1.3b	828,7	99	36,83	
Hormigón reciclado	B1.1hr	771,5	92	34,29	6%
	B1.2hr	786,4	94	34,95	
	B1.3hr	740,0	88	32,89	
Cerámica	B1.1c	624,6	74	27,76	7%
	B1.2c	655,0	78	29,11	
	B1.3c	671,8	80	29,86	
Loza	B1.1l	699,3	83	31,08	10%
	B1.2l	673,9	80	29,95	
	B1.3l	740,9	88	32,93	
Escoria de soldadura	B1.1e	840,1	100	37,34	10%
	B1.2e	927,0	110	41,2	
	B1.3e	871,2	104	38,72	
Viruta corta	B1.1vc	942,1	112	41,87	13%
	B1.2vc	822,8	98	36,57	
	B1.3vc	886,0	106	39,38	
Granalla	B1.1vl	815,8	97	36,26	13%
	B1.2vl	749,0	89	33,29	
	B1.3vl	720,0	86	32	

Tabla 7.1.2.2.1 Resistencia a compresión de las probetas cúbicas con 28 días de curado de serie B.

7.1.3 Resumen de los resultados obtenidos.

Según el Art. 86.3.2 de la EHE-08 para la aceptación de la resistencia del hormigón, el recorrido relativo de un grupo de tres probetas obtenido mediante la diferencia entre el mayor resultado y el menor, dividido por el valor medio de las tres, tomadas de la misma amasada, no podrá exceder el 20%. En el caso de dos probetas, el recorrido relativo no podrá exceder el 13%.

Como comenta en la propia EHE-08 la Comisión Permanente del Hormigón con respecto a este asunto, a los efectos de la determinación de la resistencia del hormigón, se presupone la homogeneidad del hormigón componente de cada amasada, lo cual implica atribuir a errores propios de los métodos de ensayo (momento y forma de la toma de la muestra, ejecución de la probeta, transporte y conservación, etc.), las discrepancias en los resultados obtenidos al operar con partes de la amasada. Cuando la desviación entre los resultados de una misma unidad de producto sobrepase ciertos límites (en este caso, 20% y 13% de recorrido relativo para 3 y 2 probetas, respectivamente) parece razonable no concederles suficiente representatividad sin haber realizado una verificación del proceso seguido.

7.1.3.1 Resultados de las probetas cúbicas.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en las probetas cúbicas curadas durante 28 días y el recorrido relativo de estas.

Siendo el recorrido relativo un grupo de tres probetas obtenido mediante la diferencia entre el mayor resultado y el menor, dividida por el valor medio de las tres, tomadas de la misma amasada que no podrá exceder el 20%. En el caso de dos probetas, el recorrido relativo no podrá exceder el 13%.

7.1.3.1.1 Resultados de las probetas cúbicas de la serie A realizadas con la primera dosificación.

En todos los casos, los resultados cumplen el Art. 86.3.2 de la EHE-08 sobre aceptación de resultados, anteriormente referido.

En las siguientes gráficas se muestran la comparación de resultados de los valores de las resistencias mínimas, medias y máximas de las probetas cúbicas de la serie A con 28 días de curado.

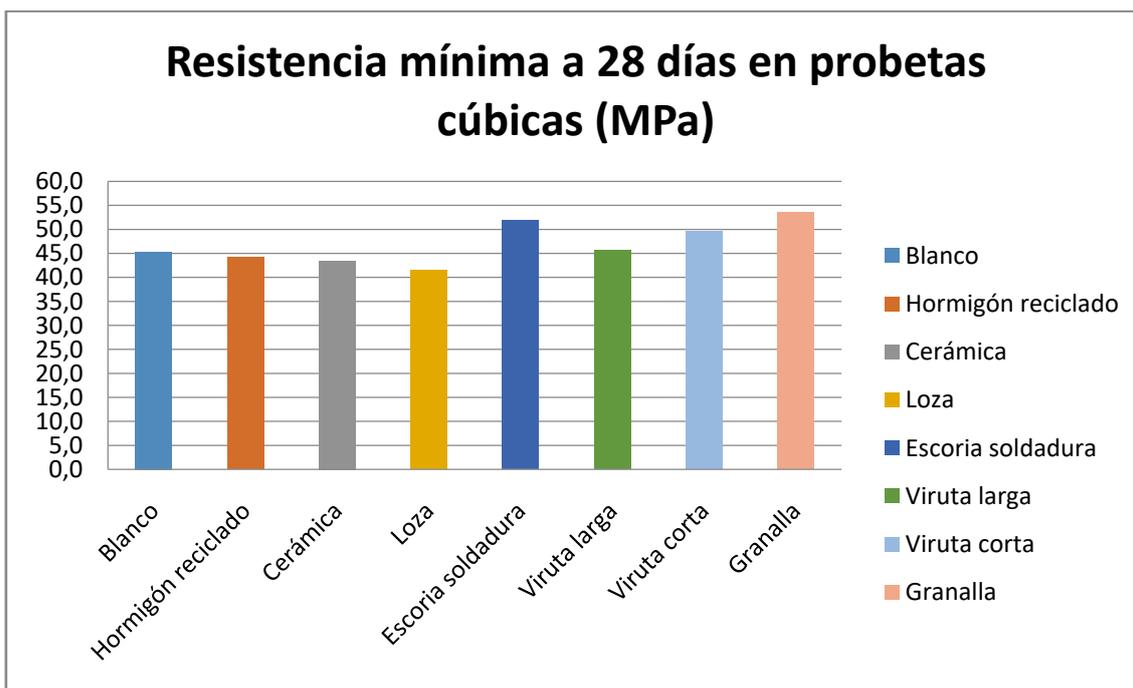


Figura 7.1.3.1.1.1 Resistencia mínima a 28 días de curado en probetas cúbicas de la serie A.

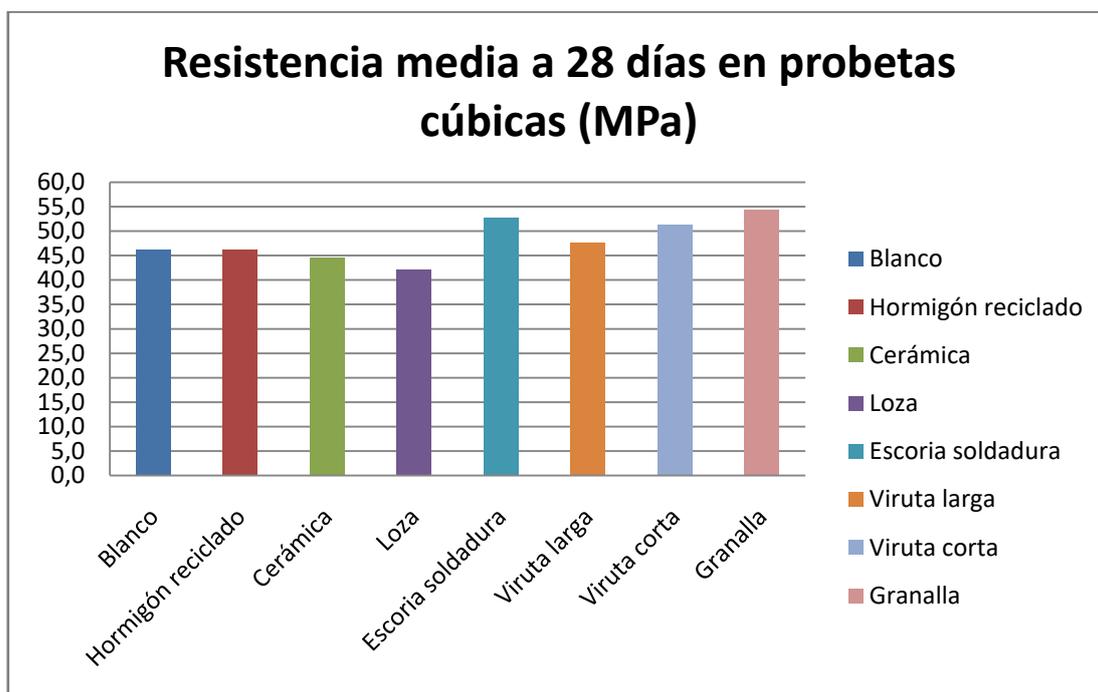


Figura 7.1.3.1.1.2 Resistencia media a 28 días de curado en probetas cúbicas de la serie A.

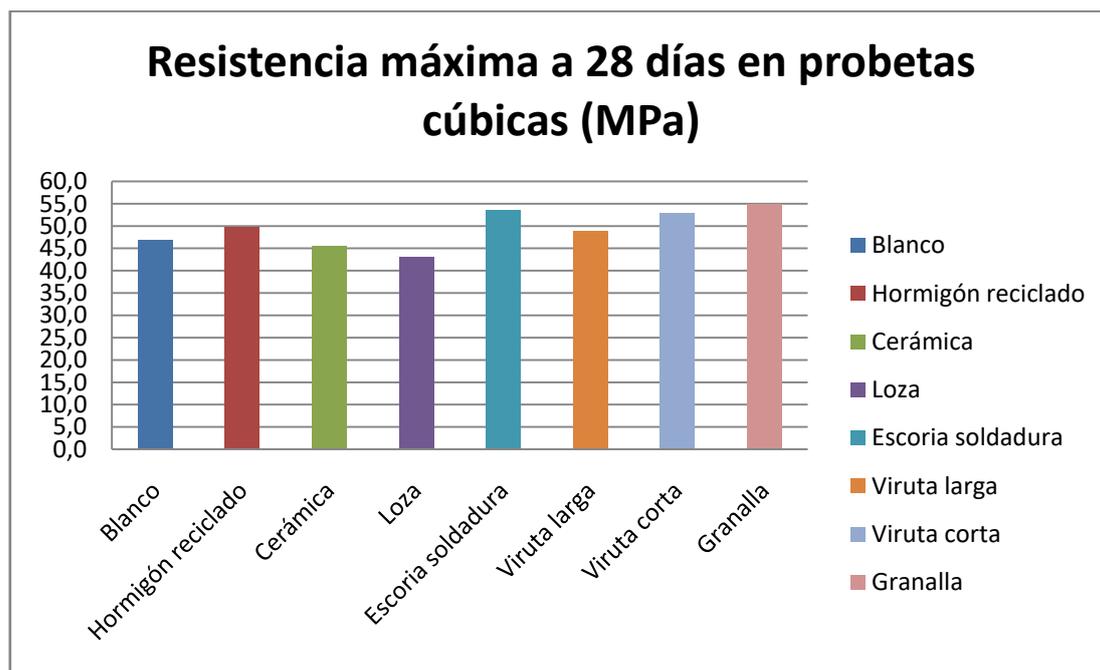


Figura 7.1.3.1.1.3 Resistencia máxima a 28 días de curado en probetas cúbicas de la serie A.

Como podemos observar en las graficas las probetas con materiales procedentes de la industria metálica tienen una resistencia mayor que las probetas en blanco. Las probetas con materiales procedentes del reciclado de edificaciones tienen una resistencia un poco menor.

Las probetas de escoria de soldadura han dado el mejor de los resultados y en contra las de loza fueron las que han dado una resistencia menor que el resto de probetas.

7.1.3.1.2 Resultados de las probetas cúbicas de la serie B realizados con la segunda dosificación.

En los segundos ensayos con probetas, la viruta larga se excluyó como material de sustitución por la mala trabajabilidad que tenía este material.

En todos los casos, los resultados cumplen el Art. 86.3.2 de la EHE-08 sobre aceptación de resultados, anteriormente referido.

En las siguientes gráficas se muestran la comparación de resultados de los valores de las resistencias mínimas, medias y máximas de las probetas cúbicas de la serie B con 28 días de curado.

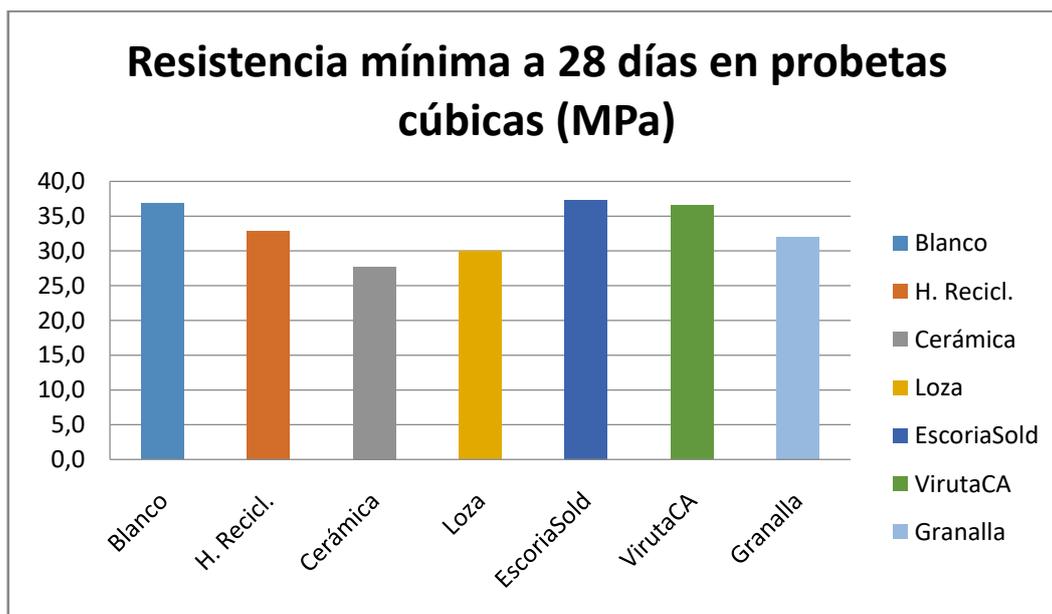


Figura 7.1.3.1.2.1 Resistencia mínima a 28 días de curado en probetas cubicas de la serie B.

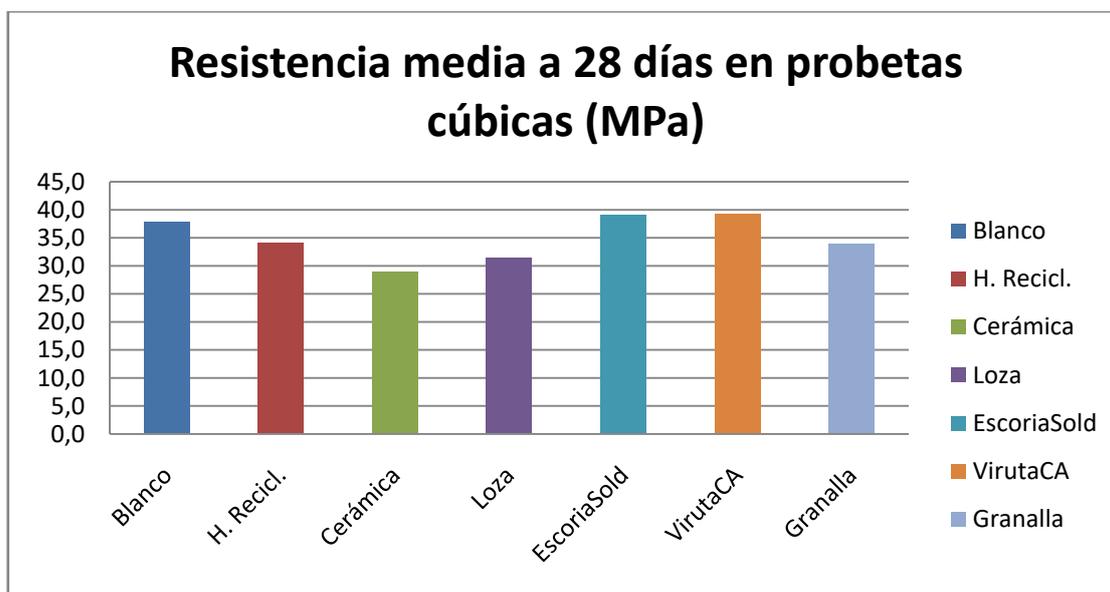


Figura 7.1.3.1.2.2 Resistencia media a 28 días de curado en probetas cubicas de la serie B.

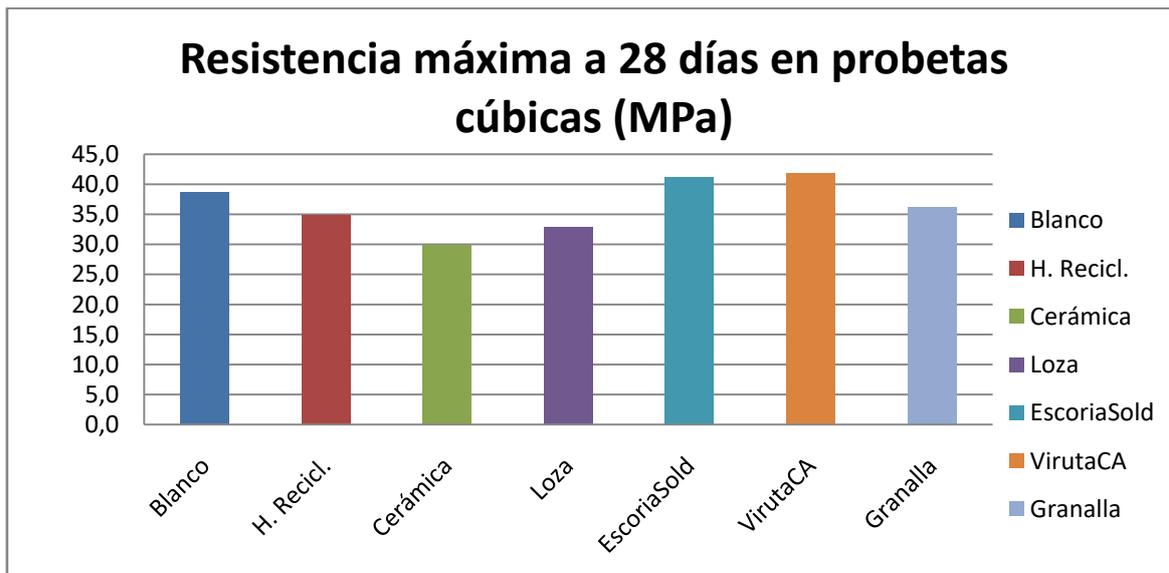


Figura 7.1.3.1.2.3 Resistencia máxima a 28 días de curado en probetas cúbicas de la serie B.

Como podemos observar en las graficas las probetas con materiales procedentes de la industria metálica tienen una resistencia mayor que las probetas en blanco. Las probetas con materiales procedentes del reciclado de edificaciones tienen una resistencia un poco menor.

Las probetas de escoria de soldadura han dado el mejor de los resultados y en contra las de cerámica han dado una resistencia menor que el resto de materiales, como se había observado en el ensayo de la serie A.

7.1.3.2 Resultados de las probetas cilíndricas.

En las siguientes gráficas se muestran la comparación de resultados de los valores de las resistencias mínimas, medias y máximas de las probetas cilíndricas con 28 días de curado.

El recorrido relativo de la probeta 1ª de hormigón con granalla es >13%. Por tanto, el resultado no es representativo al no darse este recorrido en las probetas cúbicas, y estar su coeficiente de paso muy lejos de los que resultan para el resto de probetas. En consecuencia, para el coeficiente medio sólo se tiene en cuenta la segunda probeta.

El recorrido relativo es $\leq 13\%$ y para todas las probetas restantes, los resultados cumplen con el Art. 86.3.2 de la EHE-08 sobre aceptación de resultados.

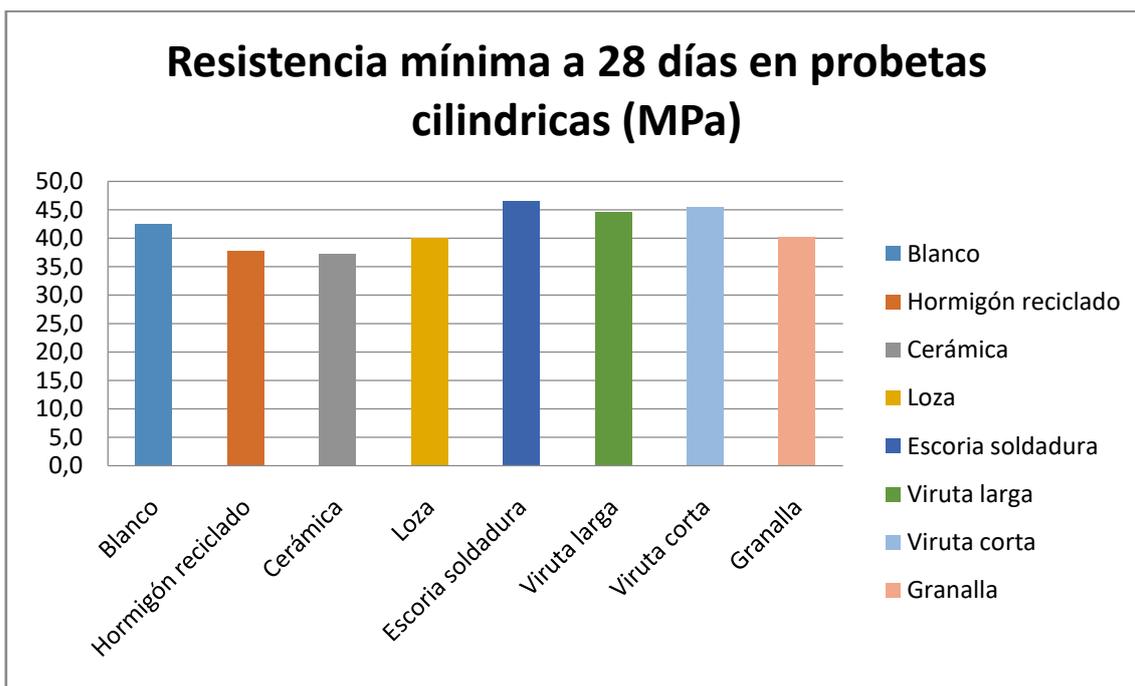


Figura 7.1.3.2.1 Resistencia mínima a 28 días de curado en probetas cilíndricas.

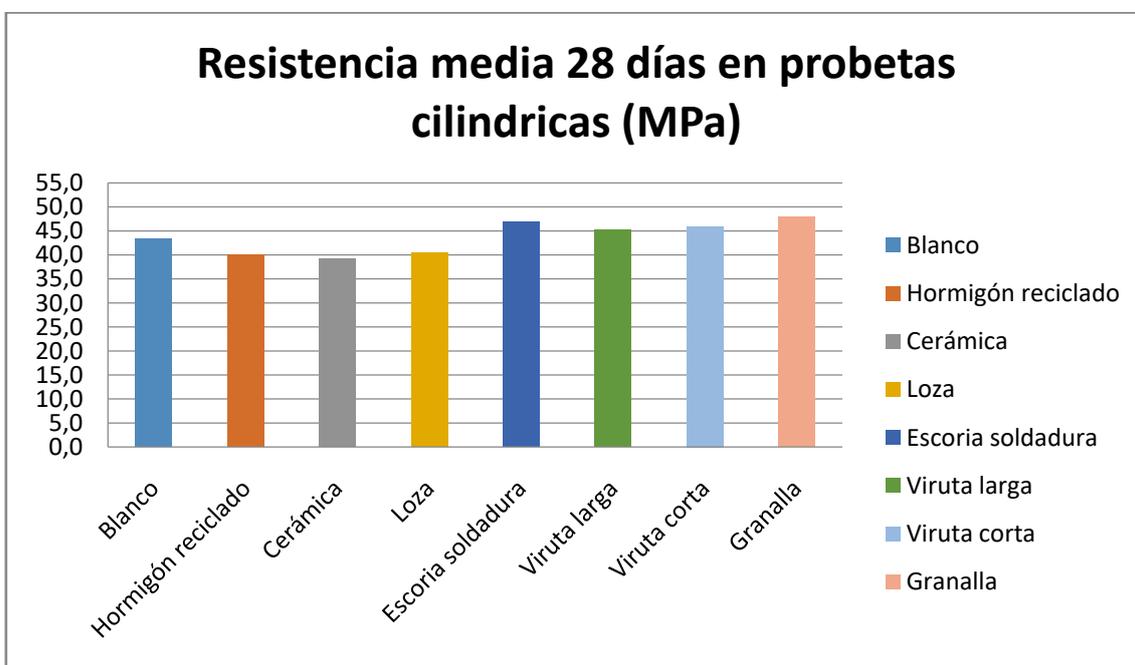


Figura 7.1.3.2.2 Resistencia media a 28 días de curado en probetas cilíndricas.

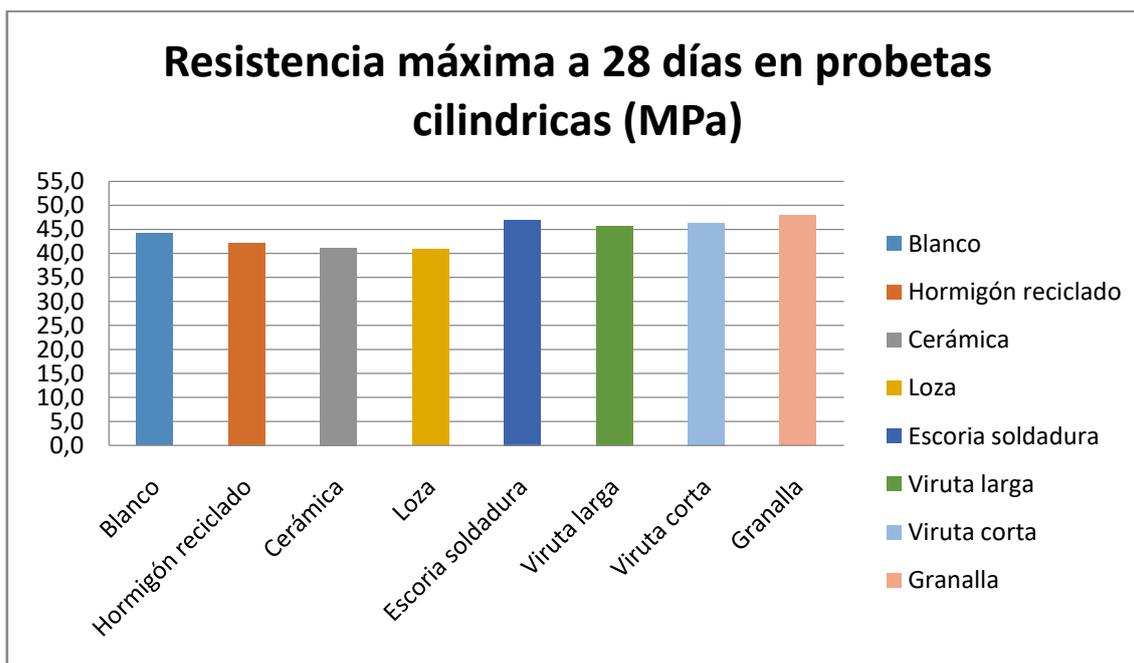


Figura 7.1.3.2.3 Resistencia máxima a 28 días de curado en probetas cilíndricas.

Como podemos observar en las graficas las probetas con materiales procedentes de la industria metálica tienen una resistencia mayor que las probetas en blanco. Las probetas con materiales procedentes del reciclado de edificaciones tienen una resistencia un poco menor.

Las probetas de escoria de soldadura han dado el mejor de los resultados y en contra las de cerámica han dado una resistencia menor que el resto materiales.

7.1.4 Probetas conservadas al aire durante 8 meses.

Este apartado incluye los resultados del ensayo a compresión de las probetas cubicas de hormigón realizadas con la primera dosificación conservadas al aire durante 8 meses, contados a partir de la fecha de extracción del tanque de curado.

Estas probetas han sido realizadas con la primera dosificación.

CUBICAS	Código de Probeta	Fuerza (kN)	Tiempo(seg)	Resistencia (Mpa)
Blanco	A2.1b	1358,9	161	60,4
HR	A2.1hr	1208,2	148	53,7
Loza	A2.1l	1234,2	148	54,85
Cerámica	A2.1c	1313,5	160	58,38
E. soldadura	A2.1e	1592,7	187	70,79

Tabla 7.1.4.1 Resistencia a compresión de las probetas conservadas al aire.

En la siguiente gráfica se puede apreciar que la resistencia a compresión de las probetas, experimenta una variación en función del tipo de material de sustitución empleado en la amasada.

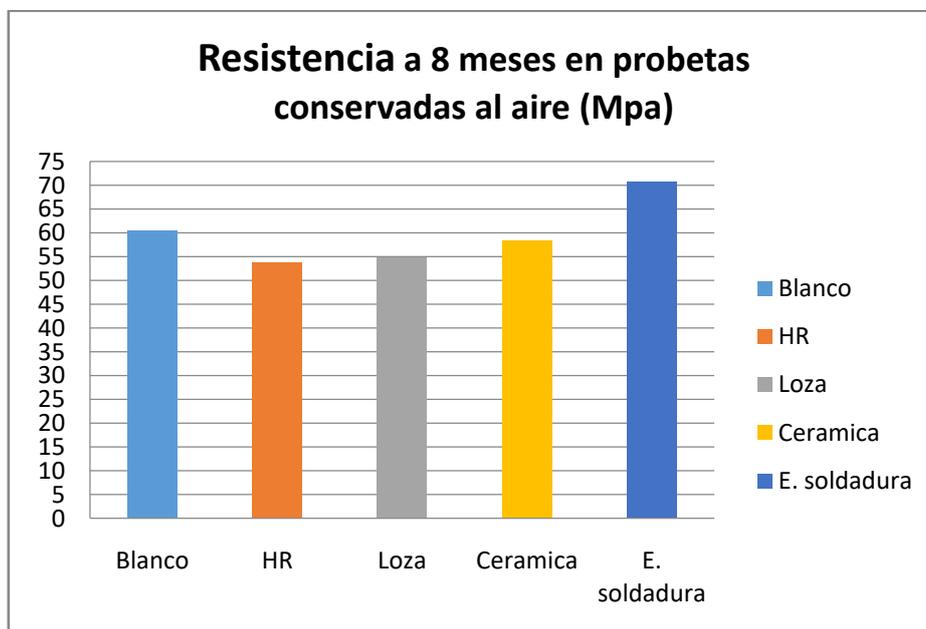


Figura 7.1.4.1 Grafico de la resistencia a compresión en Mpa de las probetas conservadas al aire.

Como podemos observar en la grafica las probetas de escoria de soldadura han dado el mejor de los resultados y en contra las de hormigón reciclado han dado una resistencia menor que el resto de materiales.

Comparando los resultados de estas probetas con los resultados obtenidos en las probetas a los 28 días, se puede observar que la resistencia es mayor en las probetas conservadas al aire durante 8 meses, pero siguen la misma tendencia de resistencia entre los materiales de sustitución.

7.1.5 Probetas conservadas en agua salada durante 8 meses.

Este apartado incluye los resultados del ensayo a compresión de las probetas cubicas de hormigón conservadas en agua salada durante 8 meses, contados a partir de la fecha de extracción del tanque de curado.

Estas probetas han sido realizadas con la primera dosificación.

CUBICAS	Fuerza (kN)	Tiempo(seg)	Resistencia (Mpa)
Blanco	A3.1b	137	51,16
HR	A3.1hr	152	56,84
Loza	A3.1l	145	54,17
Cerámica	A3.1c	151	56,58
E. soldadura	A3.1e	176	66,47

Tabla 7.1.5.1 Resistencia a compresión de las probetas conservadas en agua salada.

En la siguiente gráfica se puede apreciar que la resistencia a compresión de las probetas, experimenta una variación en función del tipo de material de sustitución empleado en la amasada.

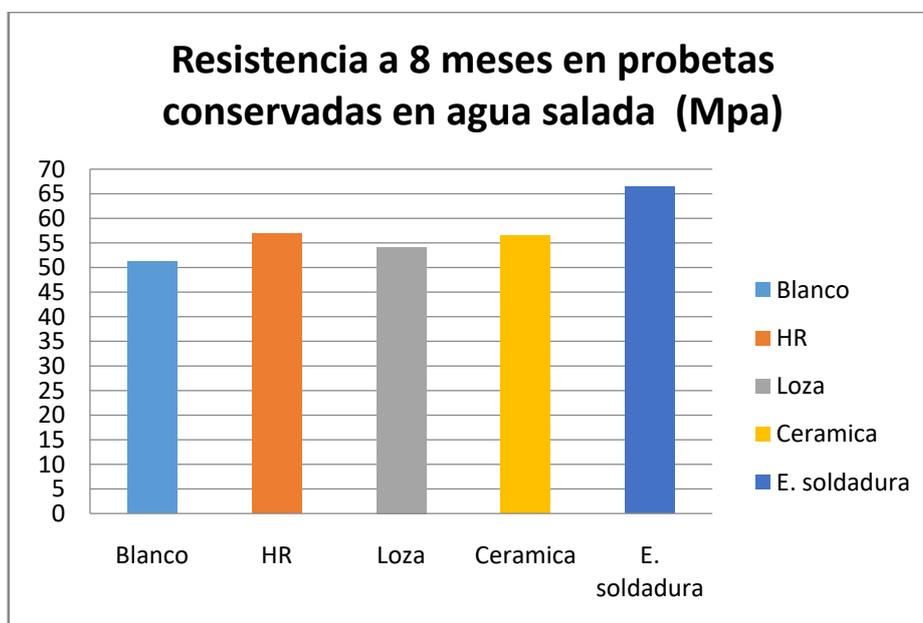


Figura 7.1.5.1 Grafico de la resistencia a compresión en Mpa de las probetas conservadas en agua salada.

Como podemos observar en la grafica las probetas con los materiales de sustitución han dado una resistencia superior a las probetas de la amasada en blanco.

Comparando los resultados de estas probetas con los resultados obtenidos en las probetas a los 28 días, se puede observar que la resistencia es mayor en las probetas conservadas al aire durante 8 meses, pero por lo general es menor que las probetas conservadas al aire

7.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CON VIGAS.

7.2.1. Introducción.

En este apartado se mostraran los resultados obtenidos en los ensayos con vigas sometidas a flexión y a cortante que fueron conservadas al aire durante 28 días.

Como el ensayo es el mismo para todas las vigas, se explicara con detalle el proceso de ensayo y a continuación se detallaran los resultados obtenidos para cada viga ensayada.

Los materiales de sustitución utilizados para las vigas han sido hormigón reciclado, cerámica, loza, escoria de soldadura, granalla y viruta corta de acero, la viruta larga se descarto por la mala trabajabilidad de esta a la hora de realizar la amasada con la segunda dosificación.

Durante el ensayo de las vigas en la cual se produce a flexión y a cortante, se han realizado paradas a 1, 1.5, 2,3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 8.5, 9 y Q toneladas, siendo Q la carga máxima que finalmente resistió la estructura en función de sus características reales. En cada parada se ha medido la flecha y la anchura de la mayor fisura de la viga, registrando en cada parada su evolución.

Tras la realización de la primera parada en 1 tonelada, se puede apreciar que en ninguna viga ha aparecido alguna fisura y que las vigas soportan dicha carga perfectamente.

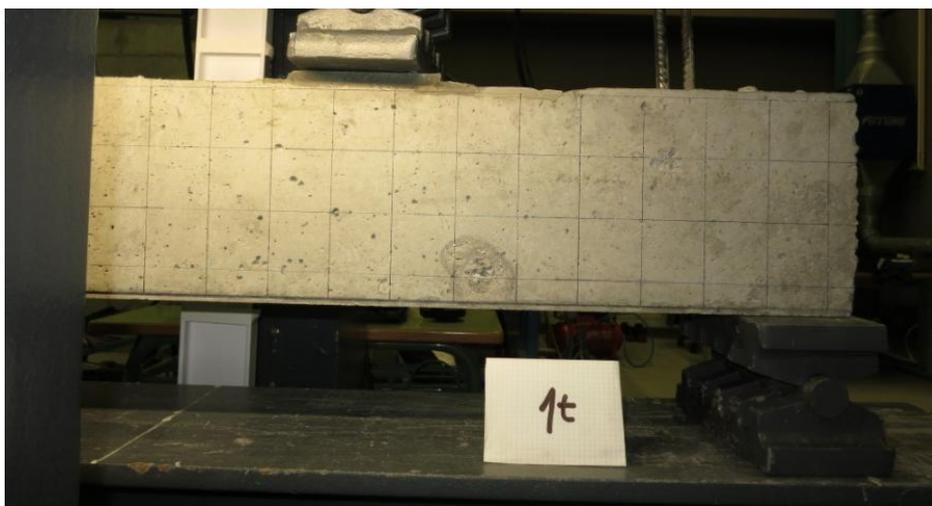


Figura 7.2.1.1 Viga durante la parada de 1 tonelada.

La carga de la viga sigue aumentando hasta llegar a la carga de 3 toneladas que es la carga de cálculo. Para esta carga todavía no se aprecia ninguna fisura en las vigas, pero la flecha de estas empieza a ser significativa.

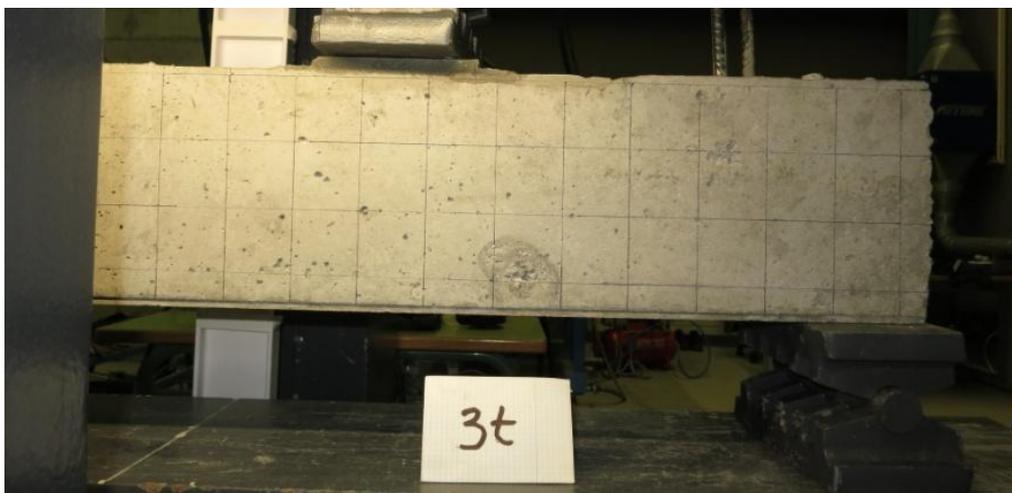


Figura 7.2.1.2 Viga durante la parada de 3 toneladas.

Las primeras fisuras aparecen a partir de las 3,5 toneladas de carga, la carga a la que aparecen las primeras fisuras es diferente dependiendo del tipo de viga que se ensaye. La anchura de las primeras fisuras es muy reducida (<1 mm). Las fisuras se sitúan en el centro de la viga en la zona lateral inferior y, por tanto, son fisura por razones de flexión.



Figura 7.2.1.3 Primeras fisuras en la viga.

Téngase en cuenta que las fisuras tiene una anchura muy reducida y no es fácil de apreciar, por lo cual en la vigas ha tenido que marcarse por medio de lápices de colores para facilitar su localización.

Según se aumenta la carga a la viga aparecen nuevas fisuras que van aumentando en su ancho, así como la flecha crece aun más debido a la carga a la que se somete. Las fisuras van aumentando hasta llegar a un ancho que se aprecia perfectamente a simple vista. En la siguiente figura podemos ver las fisuras generados por flexión y la flecha considerable que tiene la viga.

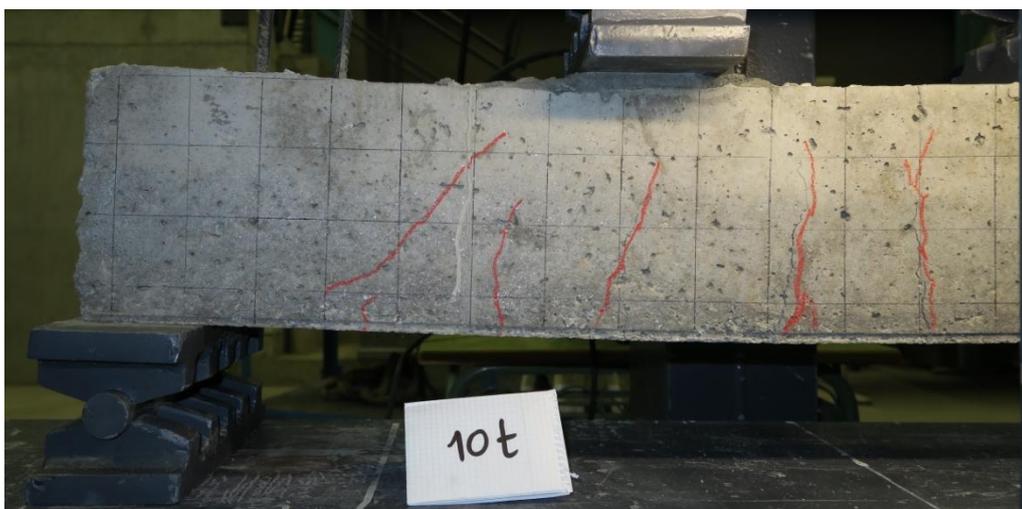


Figura 7.2.1.4 Fisuras y flecha con una carga de 10 toneladas.

Nótese que una de las fisuras es bastante inclinada y está cerca de uno de los apoyos, por tanto, lo más probable es que se deba al cortante existente en esa zona.

La carga a la que se somete la viga sigue aumentando hasta que la cabeza de compresión rompe finalmente, que es la máxima carga soportada por la viga. Con la rotura de cabeza de compresión se produce el desprendimiento del recubrimiento superior, en su zona central.



Figura 7.2.1.5 Viga después del desprendimiento de la cabeza de compresión en la parte central.

El resulta de todas las vigas es similar, las vigas resisten las cargas aplicadas llegando a una carga máxima del mismo orden de magnitud y a una figuración similar en la misma zona en todas ellas.

Dependiendo del tipo de material de sustitución puede haber una diferencia en cuanto a la carga máxima que soportan, peros todas las vigas superan con creces las 3 toneladas de carga de cálculo.

Los datos obtenidos correspondientes a todos los ensayos con vigas se adjuntan en el Anexo 4 de este trabajo.

7.2.2 Resultados de las vigas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos con vigas, así como la evolución de las vigas a lo largo del ensayo al aumentar la carga a la que se someten las vigas.

La siguiente grafica muestra los resultados obtenidos en cuanto a la flecha dl as vigas en cada carga y la comparativa entre todas las vigas.

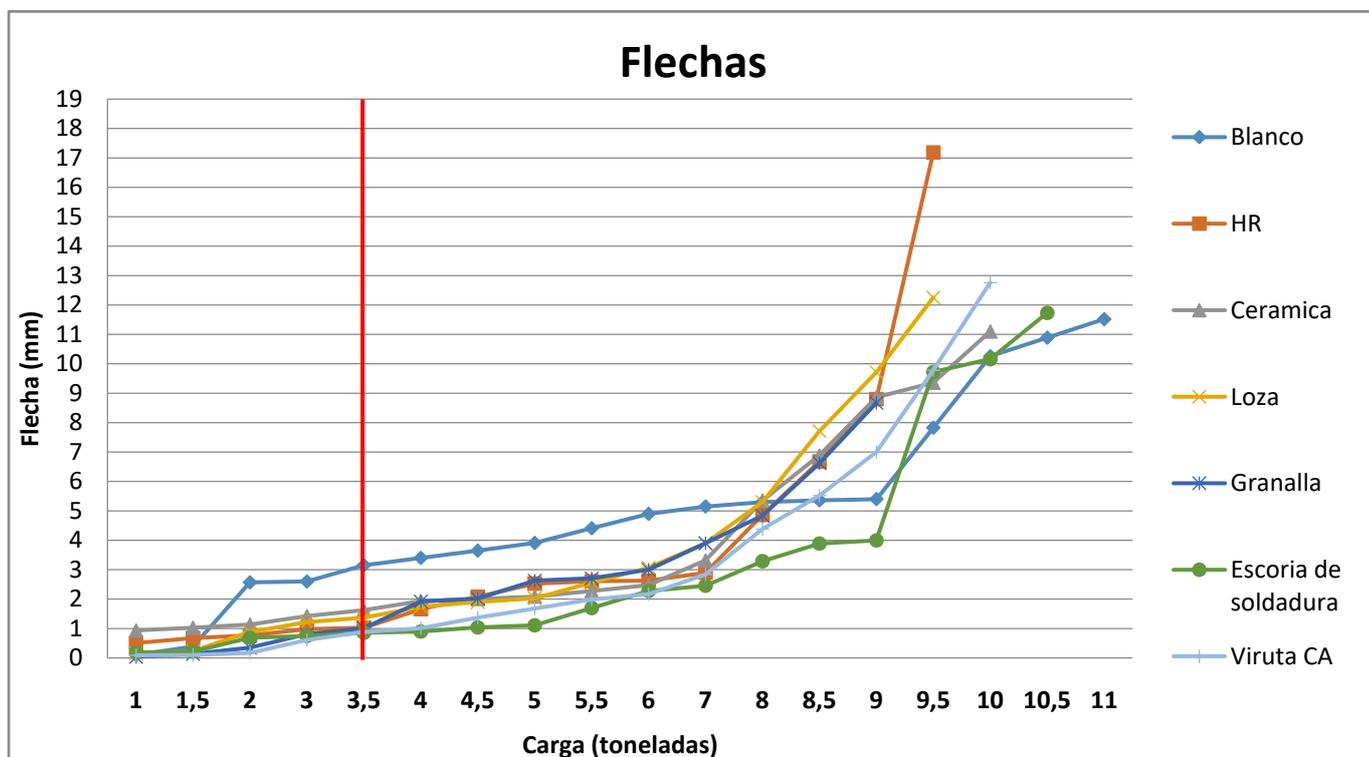


Figura 7.2.2.1 Grafica con los resultados de las flechas por carga de todas las vigas.

Los resultados de las flechas obtenidos son similares en todas las vigas ensayadas, aumentando un poco la variación a partir de las 8 toneladas de carga.

La viga en blanco se separa del resto de las vigas, teniendo unas flechas mayores por carga que el resto de vigas.

Como se observa en la grafica la viga de hormigón reciclado tiene la mayor flecha de todas siendo esta de 17,18 mm con una carga de 9,5 toneladas.

La viga de escoria de soldadura es la que tiene menores flechas por carga, llegando hasta las 9 toneladas con tan solo una flecha de 4 mm.

A continuación se muestra una grafica con los resultados obtenidos en cuanto a la fisuración de las vigas en cada carga y la comparativa entre todas las vigas.

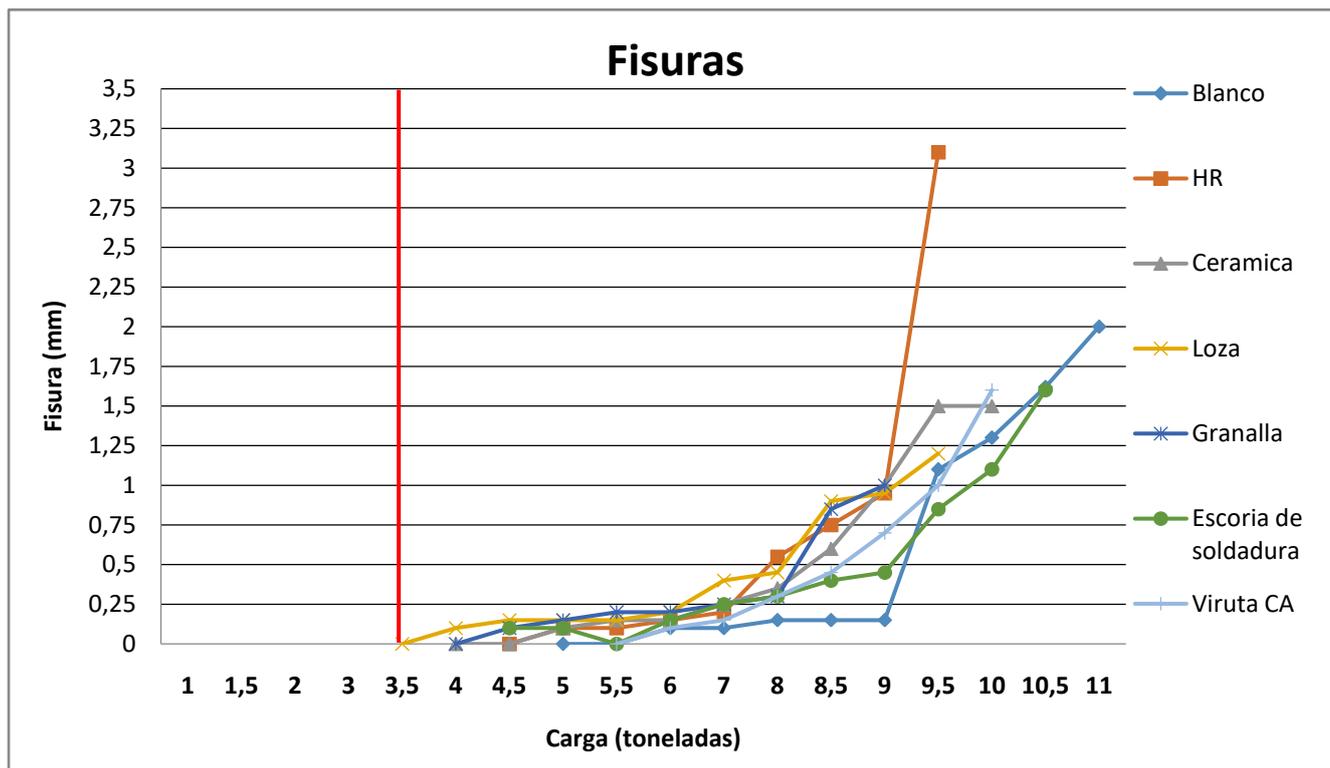


Figura 7.2.2.2 Grafica con los resultados de las fisuras por carga de todas las vigas.

Las fisuras evolucionan en todas las vigas siguiendo el mismo patrón, estas fisuras se originan en el centro de la viga causadas por la flexión.

Como observados en la grafica la viga en blanco tiene una fisuración menor por carga soportada, llegando a una carga de 9 toneladas con una fisura de 0,15 mm.

La viga de hormigón reciclado tiene la mayor fisura siendo esta de 3,1 mm con una carga de 9,5 toneladas, en cambio la viga de granalla tiene la menor fisura siendo de 1 mm con una carga de 9 toneladas.

En las siguientes graficas se muestran las fisuras máximas y la carga máxima que soporta cada viga, siendo este uno de los datos más importantes en este ensayo.

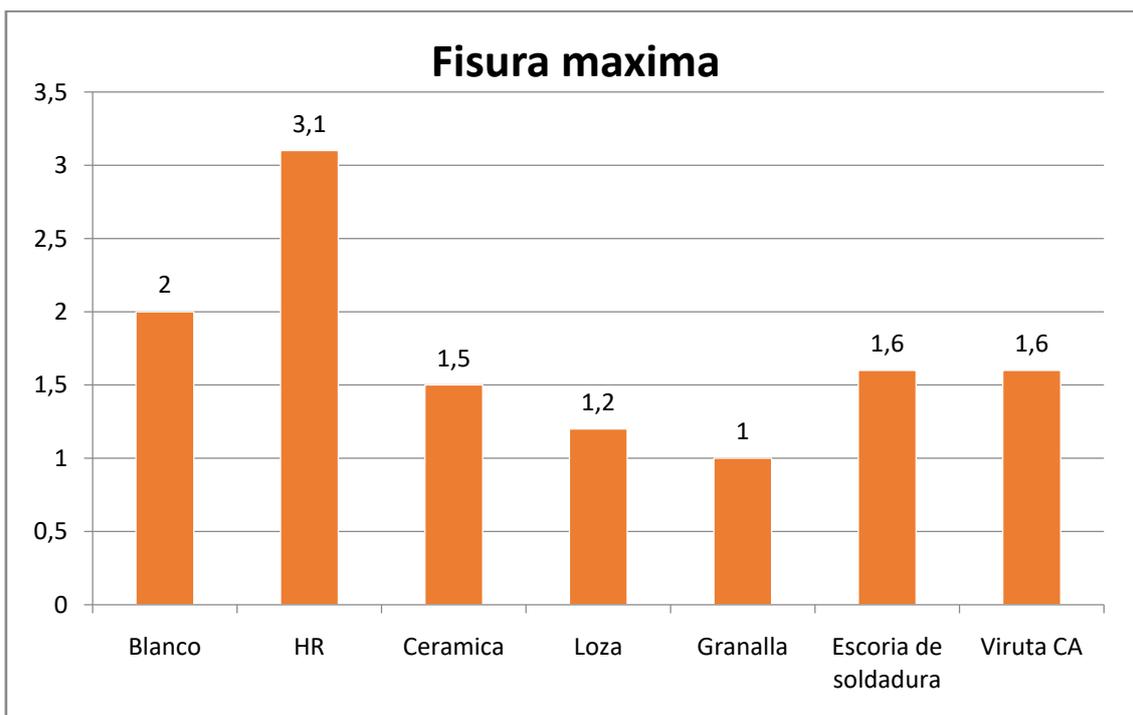


Figura 7.2.2.3 Grafica con los resultados de las fisuras máximas de todas las vigas.

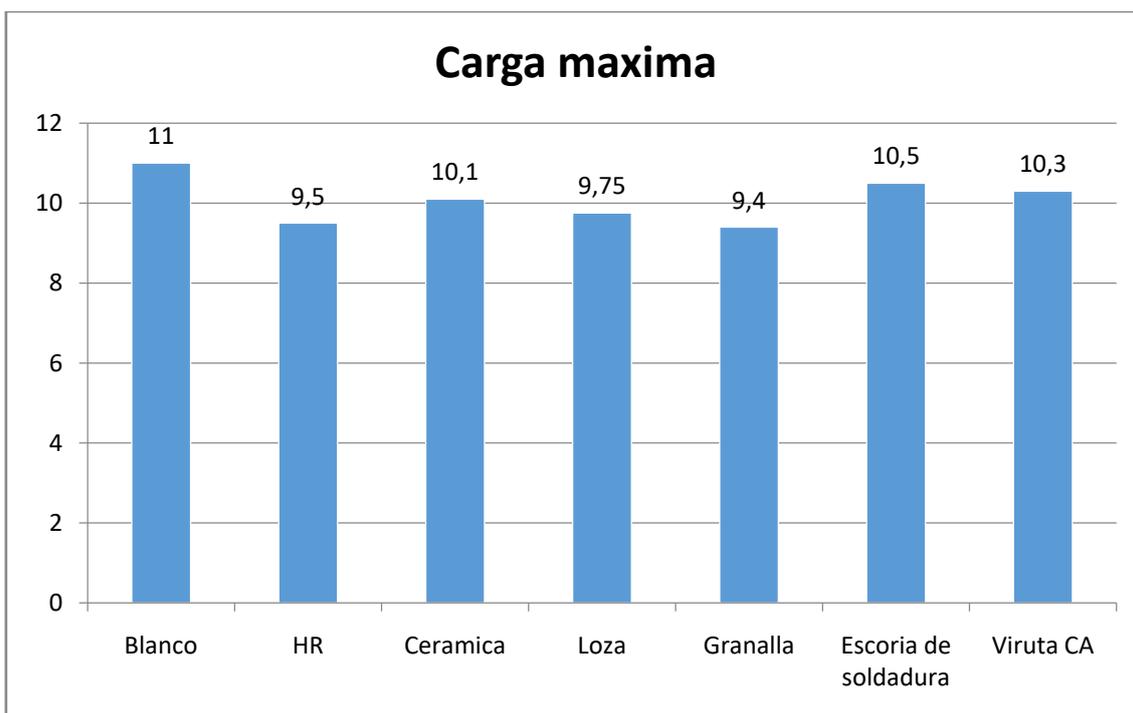


Figura 7.2.2.4 Grafica con los resultados de las cargas máximas de todas las vigas.

Los datos obtenidos correspondientes a todos los ensayos con vigas se adjuntan en el Anexo 4 de este trabajo.

8. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS.

8.1 CONCLUSIONES SOBRE LA ABSORCIÓN DE AGUA.

Los resultados obtenidos correspondientes a este estudio de absorción de cada material varían en función de las características de cada material. Teniendo en cuenta los porcentajes de absorción de los áridos convencionales se observó que los materiales de sustitución tenían una absorción menor, salvo en el caso de la grava.

La escoria de soldadura y la loza son los materiales con un porcentaje de absorción menor, en cambio la granalla que aun siendo un material metálico tiene una absorción mayor debido a la geometría de dicho material.

Los resultados obtenidos demuestran que en determinadas amasadas se ahorra hasta un 9,20% de agua, siendo esto un factor a tener en cuenta a la hora de ahorrar recursos hídricos.

En este gráfico se pueden apreciar los porcentajes de absorción los materiales.

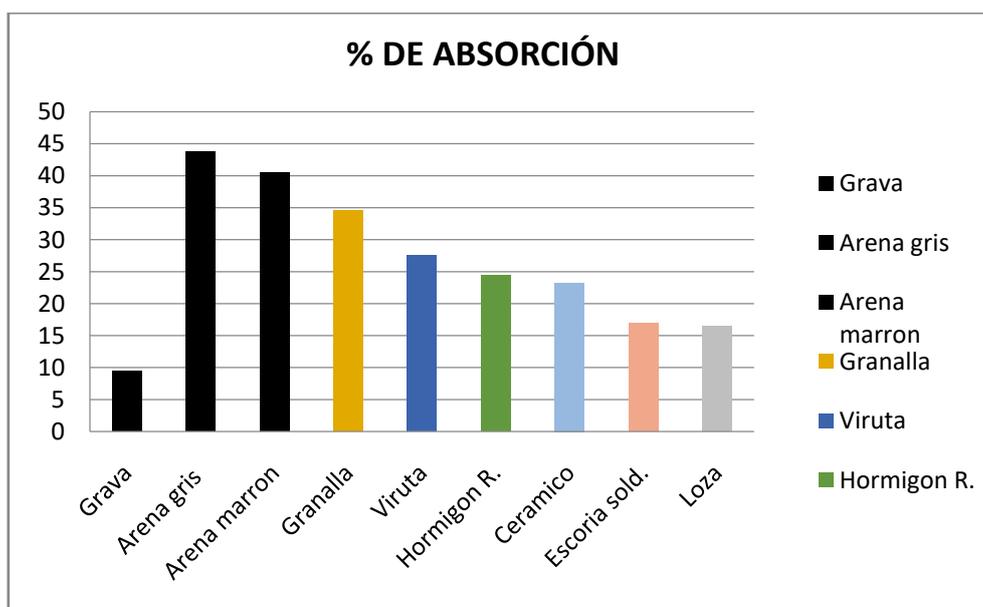


Figura 8.1.1. Gráfica con los porcentajes de adsorción de los materiales.

8.2 CONCLUSIONES SOBRE LAS PROBETAS.

La sustitución parcial al 20% del árido convencional por los materiales de sustitución nos varía la resistencia a compresión de las probetas.

Se puede apreciar que los materiales de sustitución pertenecientes al reciclado de materiales de construcción como son el hormigón reciclado, cerámica y la loza perjudican la resistencia a compresión de las probetas dando valores menores a la resistencia de las probetas en blanco. En cambio los materiales que pertenecen a la

industria metálica como son la viruta de acero, granalla y escoria de soldadura benefician la resistencia a compresión de las probetas.

El sustitutivo que mejores resultados ha dado de todos es la escoria de soldadura, siendo en casi todos los ensayos el material que ha dado una mayor resistencia a la compresión como sustitutivo de áridos. En las siguientes graficas se observa la resistencia de las probetas según el tipo de probeta y los días de curado.

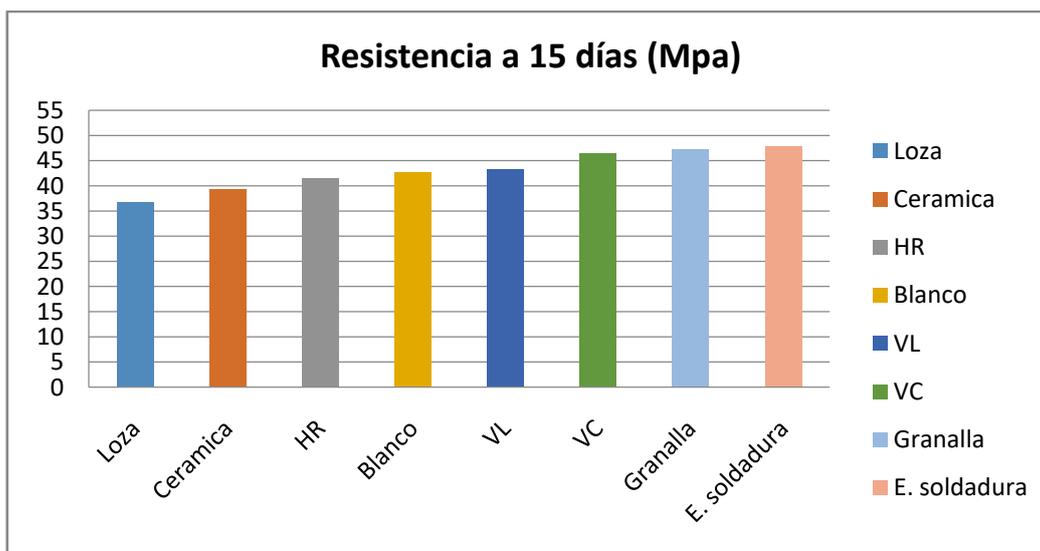


Figura 8.2.1 Grafico de la resistencia a compresión en Mpa de las probetas con 15 días de curado.

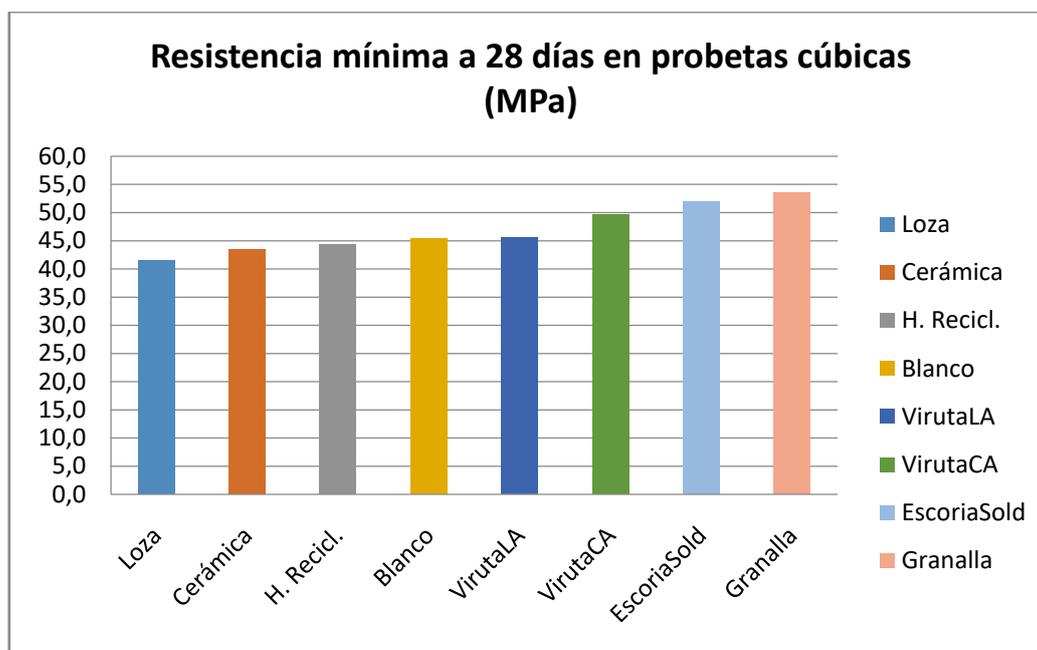


Figura 8.2.2 Resistencia mínima a 28 días de curado en probetas cubicas de la serie A.

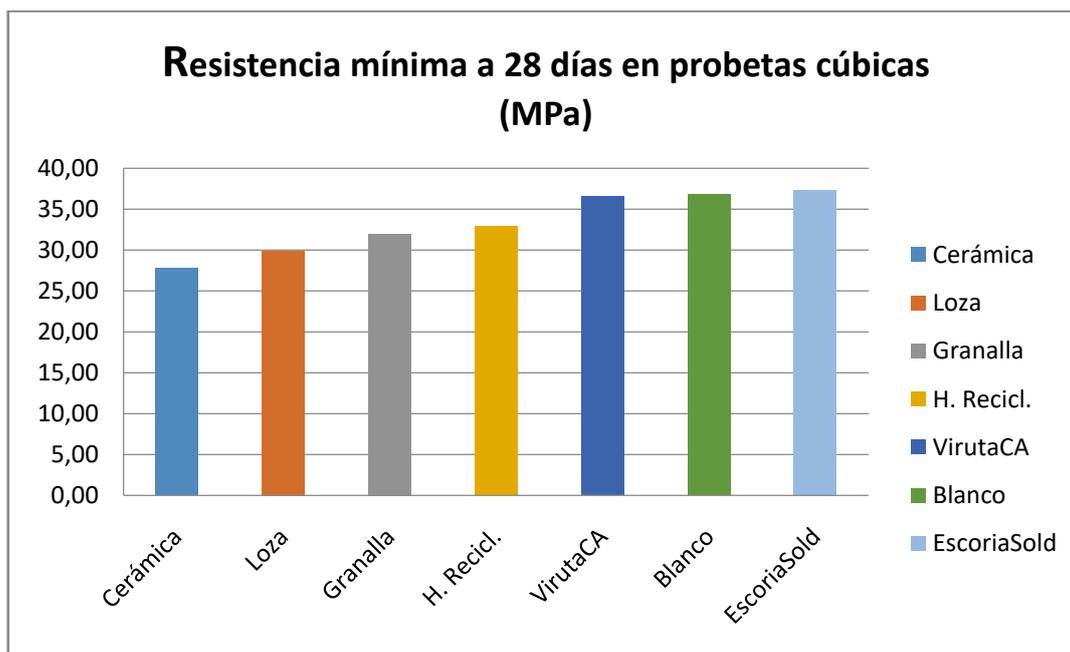


Figura 8.2.3 Resistencia mínima a 28 días de curado en probetas cúbicas de la serie B.

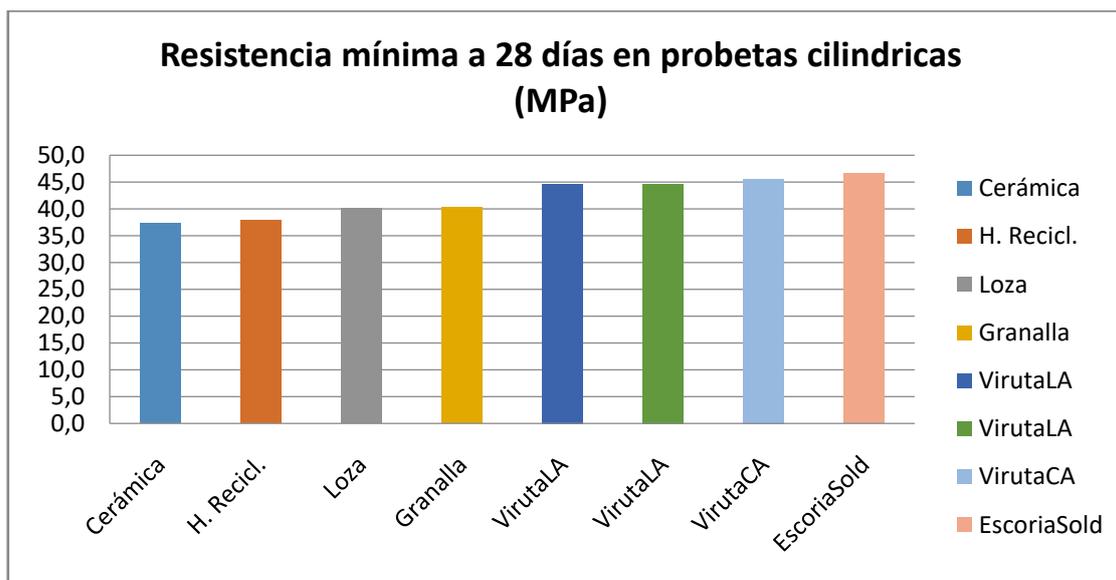


Figura 8.2.4 Resistencia mínima a 28 días de curado en probetas cilíndricas de la serie A.

En las probetas sometidas a procesos de corrosión natural, se puede apreciar que las probetas con sustitutivos procedentes del reciclado de materiales de construcción disminuyen ligeramente la resistencia de las mismas.

En el caso de las probetas conservadas al aire se puede observar que los materiales procedentes del reciclado de la construcción disminuyen la resistencia a compresión

de las probetas al contrario que la escoria de soldadura que mejora la resistencia de las probetas.

En las probetas conservadas en agua salada se aprecia que los materiales de sustitución aumentan la resistencia a compresión de las probetas, siendo la escoria de soldadura la que mejores resultados a dado.

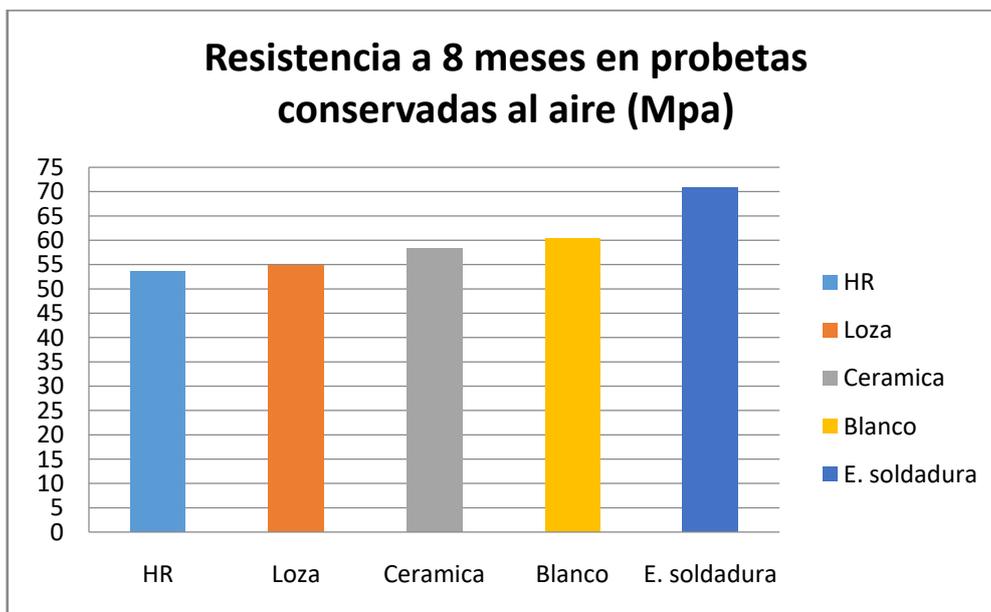


Figura 8.2.5 Resistencia compresión en Mpa de probetas cubicas conservadas al aire.

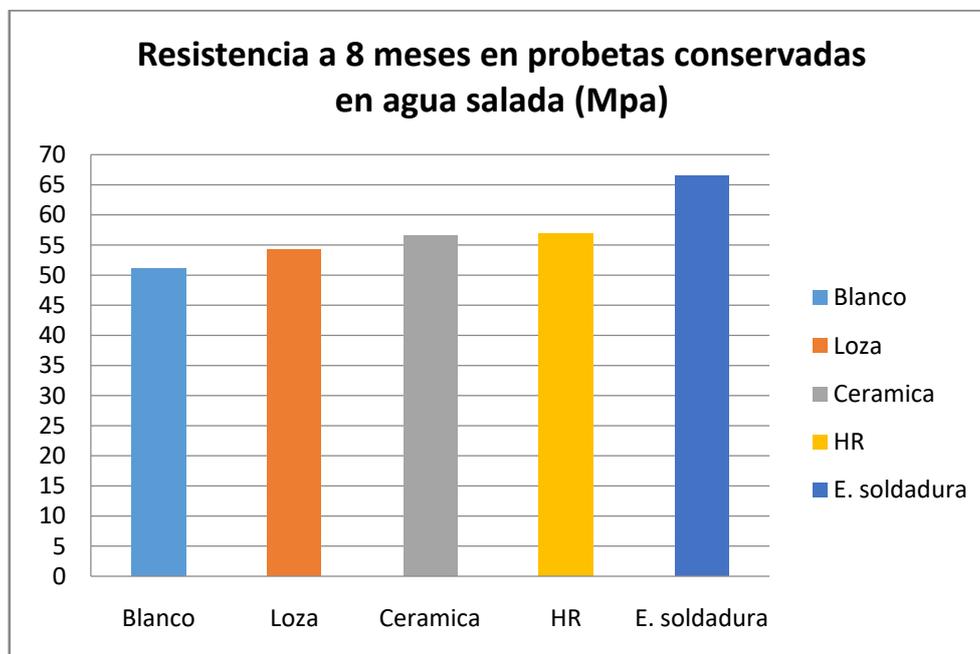


Figura 8.2.6 Resistencia compresión en Mpa de probetas cubicas conservadas en agua salada.

Con los resultados obtenidos en los diferentes ensayos que se han realizado se observa que la granalla, viruta de acero y sobre todo la escoria de soldadura son los materiales que se podrían utilizar mejor como sustitutivos.

8.3 CONCLUSIONES SOBRE LAS VIGAS.

La sustitución parcial al 20% del árido convencional por los materiales de sustitución no afecta a las vigas de forma relevante, variando levemente la carga máxima que soportan las vigas. No hay diferencias suficientemente relevantes en cuanto a las flechas, fisuración, ni en cuanto a las cargas máximas que pueden soportar.

Hay leves diferencias en las flechas de las vigas en blanco con respecto al resto, cuyas diferencias son ligeramente menores hasta llegar cerca de las 8,5 toneladas, en donde la evolución es idéntica al resto de las vigas.

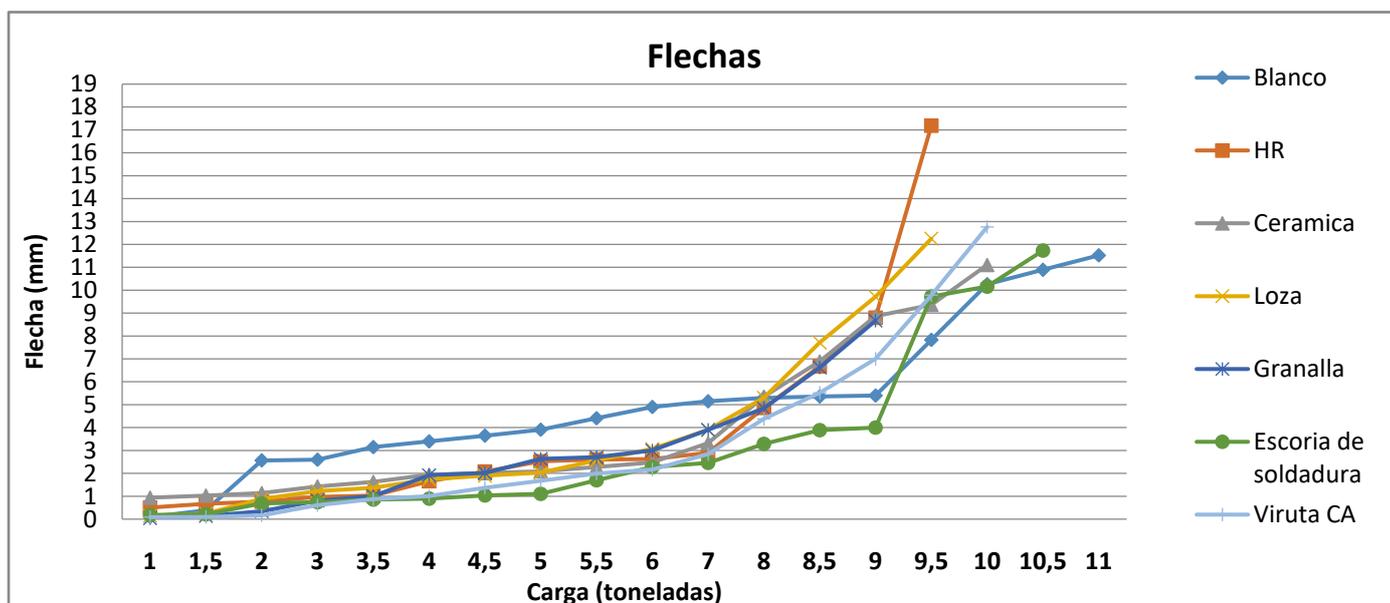


Figura 8.3.1 Grafica con los resultados de las flechas por carga de todas las vigas

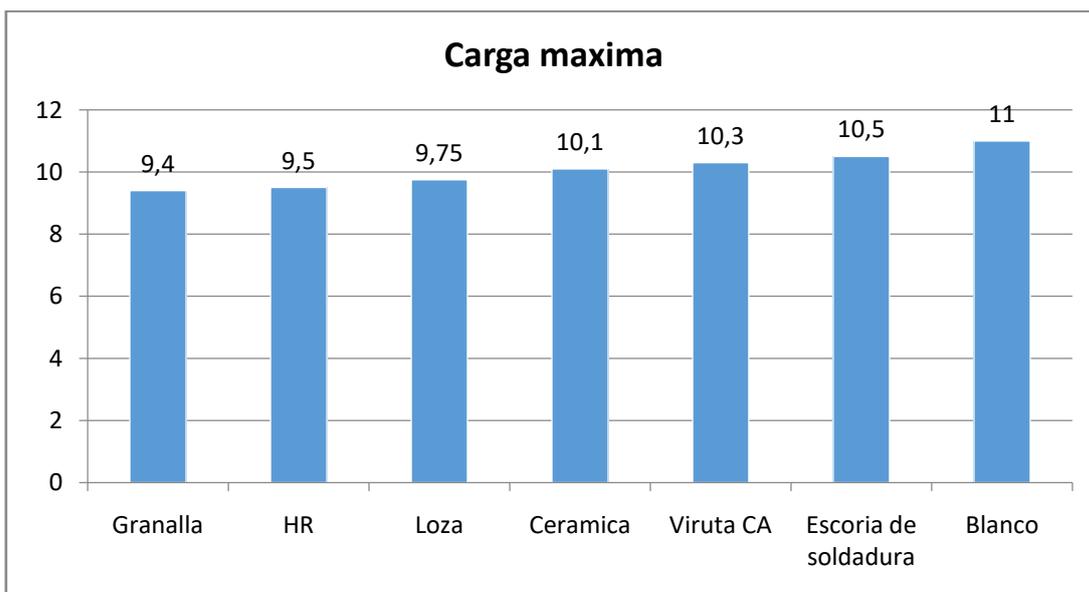


Figura 8.3.2 Grafica con los resultados de las cargas máximas de todas las vigas.

La fisuración de las vigas es muy similar en todas hasta las 8 toneladas en donde los valores se dispersan mas según el material de sustitución que lleva cada viga. La viga con escoria de soldadura sigue un patrón más lineal que el resto de vigas.

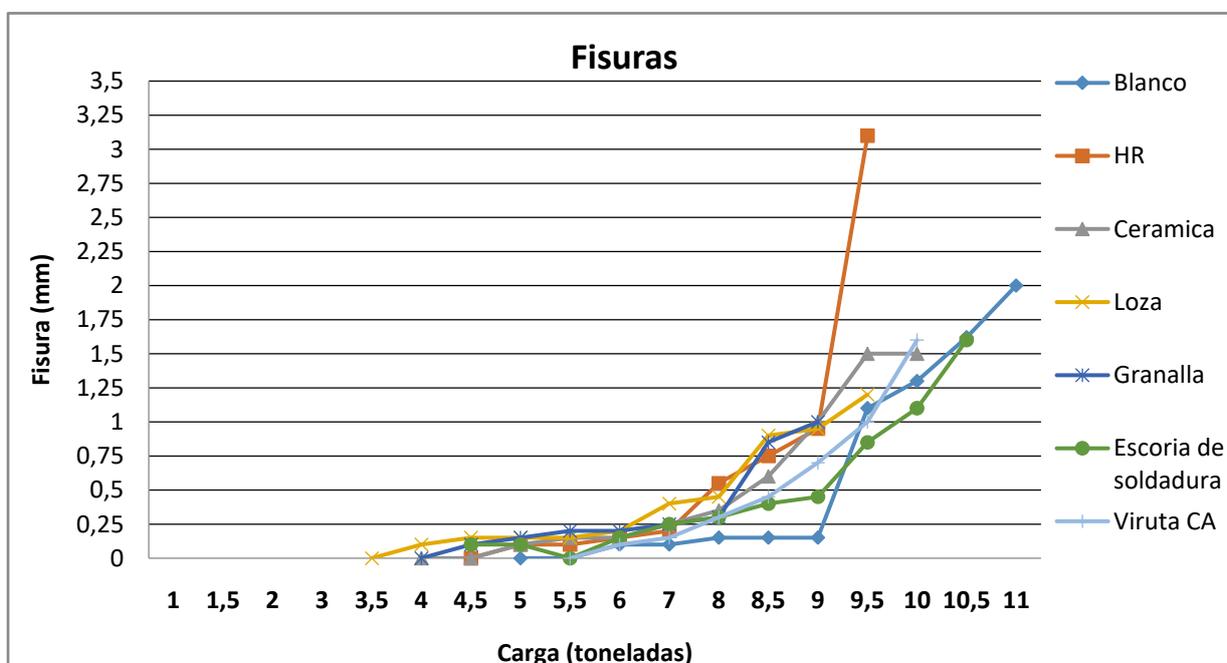


Figura 8.3.3 Grafica con los resultados de las fisuras por carga de todas las vigas.

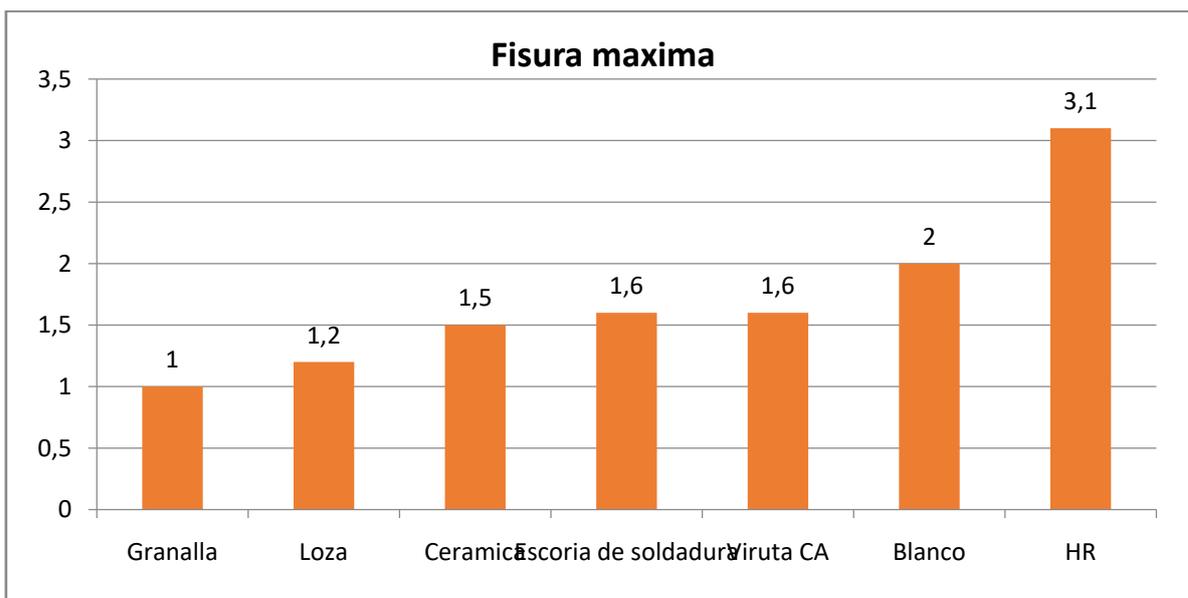


Figura 8.3 4 Grafica con los resultados de las fisuras máximas de todas las vigas.

Las vigas que mejores resultados han dado son las que contenían materiales de sustitución de la industria metálica. Por lo que los materiales que se podrían utilizar mejor serían la escoria de soldadura, la granalla y la viruta de acero como sustitutivo parcial de áridos.

9. FUTUROS DESARROLLOS.

En próximos trabajos utilizando materiales de sustitución se debería variar el porcentaje de sustitución utilizado y así determinar para cada material cual sería el porcentaje ideal a la hora de sustituir los áridos. Otro punto a tener en cuenta sería continuar con los materiales procedentes de la industria metálica siendo éstos los que mejores resultados han dado en los ensayos.

En futuros ensayos también se deberían de ensayar más vigas sometiendo estas a corrosión natural y corrosión acelerada, evaluando el deterioro de las armaduras de las vigas sometidas a procesos de corrosión, pesándolas antes y después de someterlas a dicho proceso, para cuantificar la pérdida de acero debido a la corrosión.

Para ensayos posteriores sería preciso desarrollar una ecuación que permita establecer una relación entre la corrosión acelerada y la corrosión natural, de forma que podamos determinar el plazo de corrosión natural que le corresponde un determinado plazo de corrosión acelerada.

10. REFERENCIAS.

Del Caño, A., de la Cruz, MP. (2016). Técnicas experimentales en Ingeniería Industrial. Experimentos de laboratorio para medidas de propiedades de materiales. Apuntes. Departamento de Ingeniería Industrial II. Escuela Politécnica Superior. Universidade da Coruña.

Fernández Cánovas M. (2013). Hormigón. Madrid: Garceta.

Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, MP. (2016). Dimensionamiento de vigas de hormigón armado sometidas a flexión simple y a cortante. Apuntes. Departamento de Ingeniería Industrial II. Escuela Politécnica Superior. Universidade da Coruña.

Meseguer A., Morán, F., Arroyo J.C. (2009). Jiménez Montoya. Hormigón Armado. Barcelona: Gustavo Gili.

Martinez Lage. M.I. (2006). Estudio sobre los residuos de construcción y demolición en Galicia: método de estimación de la producción anual y usos posibles para su reciclaje. Departamento de Tecnología de la Construcción. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña.

Plaza Gámez, B. (2014). Estudio de la posibilidad de sustitución de hormigones tradicionales por hormigones ecológicos fabricados con conglomerados procedentes de residuos industriales y áridos reciclados. E.T.S de Gestión de la Edificación. Universidad Politécnica de Valencia.

Sánchez Rodríguez, Albert (2011). Realizo un estudio sobre el análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña

O.R.Batic, J.D. Sota, D.D.Falcone (2006). Estudio sobre la influencia de la incorporación de escoria en las características de los hormigones resultantes. Universidad Tecnológica Nacional, 2006. San Rafael, Mendoza, Argentina.

C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco. Hormigón estructural reciclado de hormigón con residuos prefabricados. Laboratorio Arcotecnos. Gran Vía nº 11 Esc B 4º 6ª 50.006 Zaragoza.

Rui Vasco Silva, Jorge de Brito, Ravindra Kumar Dhir (2015). Estudio para establecer una relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión del hormigón con agregado de hormigón reciclado. Universidad Politécnica de Cataluña

Ana de Guzmán Báez (2010). Estudio de las propiedades fundamentales de elementos prefabricados de hormigón no estructurales, con incorporación de árido reciclado en su fracción gruesa y fina. E.U. de Arquitectura técnica. Universidad Politécnica de Madrid

NORMATIVA

Ministerio de Fomento, 2008a. Instrucción para la recepción de cementos RC-08. Ministerio de Fomento.

Ministerio de Fomento, 2008b. Instrucción de hormigón estructural EHE-08. Ministerio de Fomento.

UNE-EN 197-1, "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes". Diciembre 2011: MADRID: AENOR

UNE EN 932-5, "Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 5: Equipo común y calibración". Septiembre 2012. MADRID: AENOR

UNE EN 933-1, "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas Método del tamizado". Julio 2012. MADRID: AENOR

UNE EN 933-2, "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas". Febrero 1999. MADRID: AENOR

UNE-EN 12350-1, "Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras". Noviembre 2009. MADRID: AENOR

UNE-EN 12350-2, “Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.”
Noviembre 2009. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-1, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes”. Agosto 2013. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-2, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia”. Noviembre 2009. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-2/AC, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia”. Julio 2015. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-3, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”. Septiembre 2011. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-3/AC, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”. Diciembre 2011. MADRID: AENOR

UNE-EN 12390-4, “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo”. Enero 2001. MADRID: AENOR



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster
CURSO 2016/17

*ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE
CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE
HORMIGONES QUE INCORPORAN RECICLADO
DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA*

Máster en Ingeniería Industrial

Anexo 1

PLANIFICACIÓN DE ENSAYOS

INDICE

1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	4
1.2.1 Probetas cubicas serie A.	4
1.2.2 Probetas cilíndricas serie A.....	5
1.2.3 Probetas cubicas serie B.	6
1.2.4 Vigas.	7

1.1 INTRODUCCIÓN.

En este anexo se muestran las fechas relevantes del trabajo de laboratorio objeto de estudio.

El primer ensayo fue el estudio granulométrico con el que se estimó la dosificación de las amasadas de hormigón.

En la primera serie (serie A) se hicieron 6 probetas cúbicas y 2 probetas cilíndricas, con la dosificación estimada con la curva de Bolomey. Se hicieron 8 amasadas distintas: una de hormigón convencional denominado “blanco” y siete con sustitución o agregación de distintos materiales provenientes de la industria. El curado de las probetas cúbicas fue introduciéndolas en el baño de agua a 20°C (+-2°C) según la norma española. A los 15 días de curado se ensayó una probeta de cada amasada para comprobar su resistencia y a los 28 días se extrajeron las restantes. Las probetas cilíndricas y tres de las probetas cúbicas se ensayaron a compresión en la máquina de ensayos para comprobar su resistencia. Los dos restantes probetas cúbicas se dejaron curando hasta los ocho meses, una al aire y la otra se introdujo en un baño de agua salada; pasada esa fecha se ensayaron para comprobar su resistencia.

En la segunda serie (serie B) sólo se hicieron 3 probetas cúbicas de siete amasadas distintas, el convencional y con seis materiales de la industria (uno se descartó en la primera serie) con una nueva dosificación y se curaron según la norma española durante 28 días, fecha en que se realizó el ensayo. También con estas amasadas se realizaron vigas que se curaron al aire y se sometieron al pórtico de ensayo para su estudio.

1.2 PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS.

1.2.1 Probetas cubicas serie A.

Tipo de probeta	Numero de probeta	Fecha Desmolde	Fecha sumergida en agua salada	Fecha al aire	Rotura a 15 días	Rotura a 28 días	Rotura a 8 meses
Blanco	A1.1b	12/05/2016	--	--	27/05/2016	--	--
	A1.2b	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A1.3b	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A1.4b	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A2.1b	12/05/2016	--	12/05/2016	--	--	11/01/2017
	A3.1b	12/05/2016	12/05/2016	--	--	--	11/01/2017
Hormigón reciclado	A1.1hr	12/05/2016	--	--	27/05/2016	--	--
	A1.2hr	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A1.3hr	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A1.4hr	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A2.1hr	12/05/2016	--	12/05/2016	--	--	11/01/2017
	A3.1hr	12/05/2016	12/05/2016	--	--	--	11/01/2017
Cerámica	A1.1c	13/05/2016	--	--	28/05/2016	--	--
	A1.2c	13/05/2016	--	--	--	10/06/2016	--
	A1.3c	13/05/2016	--	--	--	10/06/2016	--
	A1.4c	13/05/2016	--	--	--	10/06/2016	--
	A2.1c	13/05/2016	--	13/05/2016	--	--	12/01/2017
	A3.1c	13/05/2016	13/05/2016	--	--	--	12/01/2017
Loza	A1.1l	12/05/2016	--	--	27/05/2016	--	--
	A1.2l	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A1.3l	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A1.4l	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A2.1l	12/05/2016	--	12/05/2016	--	--	11/01/2017
	A3.1l	12/05/2016	12/05/2016	--	--	--	11/01/2017

Escoria de soldadura	A1.1e	13/05/2016	--	--	28/05/2016	--	--
	A1.2e	13/05/2016	--	--	--	10/06/2016	--
	A1.3e	13/05/2016	--	--	--	10/06/2016	--
	A1.4e	13/05/2016	--	--	--	10/06/2016	--
	A2.1e	13/05/2016	--	13/05/2016	--	--	12/01/2017
	A3.1e	13/05/2016	13/05/2016	--	--	--	12/01/2017
Viruta larga	A1.1vl	19/05/2016	--	--	03/06/2016	--	--
	A1.2vl	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
	A1.3vl	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
	A1.4vl	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
Viruta Corta	A1.1vc	19/05/2016	--	--	03/06/2016	--	--
	A1.2vc	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
	A1.3vc	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
	A1.4vc	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
Granalla	A1.1g	19/05/2016	--	--	03/06/2016	--	--
	A1.2g	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
	A1.3g	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
	A1.4g	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--

Tabla 1.2.1.1 Fechas correspondientes a las probetas cúbicas de la serie A.

1.2.2 Probetas cilíndricas serie A.

Tipo de probeta	Numero de probeta	Fecha Desmolde	Fecha sumergida en agua salada	Fecha al aire	Rotura a 15 días	Rotura a 28 días	Rotura a 8 meses
Blanco	A1.1b	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A1.2b	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
Hormigón r.	A1.1hr	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A1.2hr	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--

Cerámica	A1.1c	13/05/2016	--	--	--	10/06/2016	--
	A1.2c	13/05/2016	--	--	--	10/06/2016	--
Loza	A1.1l	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
	A1.2l	12/05/2016	--	--	--	09/06/2016	--
Escoria de soldadura	A1.1e	13/05/2016	--	--	--	10/06/2016	--
	A1.2e	13/05/2016	--	--	--	10/06/2016	--
Viruta larga	A1.1vl	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
	A1.2vl	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
Viruta Corta	A1.1vc	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
	A1.2vc	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
Granalla	A1.1g	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--
	A1.2g	19/05/2016	--	--	--	18/06/2016	--

Tabla 1.2.2.1 Fechas correspondientes a las probetas cilíndricas de la serie A.

1.2.3 Probetas cubicas serie B.

Tipo de probeta	Numero de probeta	Fecha Desmolde	Fecha sumergida en agua salada	Fecha al aire	Rotura a 15 días	Rotura a 28 días	Rotura a 8 meses
Blanco	B1.1b	16/11/2016	--	--	--	14/01/2017	--
	B1.2b	16/11/2016	--	--	--	14/01/2017	--
	B1.3b	16/11/2016	--	--	--	14/01/2017	--
Hormigón reciclado	B1.1hr	17/11/2016	--	--	--	15/01/2017	--
	B1.2hr	17/11/2016	--	--	--	15/01/2017	--
	B1.3hr	17/11/2016	--	--	--	15/01/2017	--
Cerámica	B1.1c	17/11/2016	--	--	--	15/01/2017	--
	B1.2c	17/11/2016	--	--	--	15/01/2017	--
	B1.3c	17/11/2016	--	--	--	15/01/2017	--

Loza	B1.1l	21/11/2016	--	--	--	19/01/2017	--
	B1.2l	21/11/2016	--	--	--	19/01/2017	--
	B1.3l	21/11/2016	--	--	--	19/01/2017	--
Escoria de soldadura	B1.1e	21/11/2016	--	--	--	19/01/2017	--
	B1.2e	21/11/2016	--	--	--	19/01/2017	--
	B1.3e	21/11/2016	--	--	--	19/01/2017	--
Viruta Corta	B1.1vc	22/11/2016	--	--	--	20/01/2017	--
	B1.2vc	22/11/2016	--	--	--	20/01/2017	--
	B1.3vc	22/11/2016	--	--	--	20/01/2017	--
Granalla	B1.1g	22/11/2016	--	--	--	20/01/2017	--
	B1.2g	22/11/2016	--	--	--	20/01/2017	--
	B1.3g	22/11/2016	--	--	--	20/01/2017	--

Tabla 1.2.3.1 Fechas correspondientes a las probetas cúbicas de la serie B.

1.2.4 Vigas.

Tipo de viga	Fecha Desmolde	Fecha sumergida en agua salada	Fecha al aire	Rotura a 15 días	Rotura a 28 días	Rotura a 8 meses
Blanco	16/11/2016	--	16/11/2016	--	14/01/2017	--
Hormigón reciclado	17/11/2016	--	17/11/2016	--	15/01/2017	--
Cerámica	17/11/2016	--	17/11/2016	--	15/01/2017	--
Loza	21/11/2016	--	21/11/2016	--	19/01/2017	--

Escoria de soldadura	21/11/2016	--	21/11/2016	--	19/01/2017	--
Viruta Corta	22/11/2016	--	22/11/2016	--	20/01/2017	--
Granalla	22/11/2016	--	22/11/2016	--	20/01/2017	--

Tabla 1.2.4.1 Fechas correspondientes a las vigas.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster
CURSO 2016/17

*ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE
CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE
HORMIGONES QUE INCORPORAN RECICLADO
DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA*

Máster en Ingeniería Industrial

Anexo 2

DATOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE TAMIZADO

INDICE

2.1 INTRODUCCIÓN.....	3
2.2 RESULTADOS.	4
2.2.1 Resultados de la arena fina.	4
2.2.2 Resultados de la arena gruesa.	7
2.2.3 Resultados de la grava.	10
2.3 RESUMEN DE RESULTADOS.	13

2.1 INTRODUCCIÓN.

En este anexo se muestran los resultados de los tres tipos de áridos, obtenidos en el proceso de tamizado correspondiente al análisis granulométrico realizado, según la norma UNE EN 933-1, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puerto de la Universidade da Coruña.

2.2 RESULTADOS.

2.2.1 Resultados de la arena fina.

2.2.1.1 Muestra de arena fina G2.

Tamaño tamiz	Tara tamiz	Masa de material retenido		% de mat. Retenido	% acumulado que se queda	% acumulado que pasa
		tara+peso	peso (Ri)			
4	442,4	483,24	40,84	4,09	4,09	95,91
2	515,03	625,95	110,92	11,11	15,20	84,80
1	376,1	586,21	210,11	21,05	36,25	63,75
0,5	447,46	664,9	217,44	21,78	58,03	41,97
0,25	423,26	613,93	190,67	19,10	77,13	22,87
0,125	411,49	533,99	122,5	12,27	89,40	10,60
0,063	305,68	374,76	69,08	6,92	96,32	3,68
Ciego P	487,97	496,97	9	0,90	97,22	2,78
			970,56	97,22		
					Modulo granulométrico	2,80

Tabla 2.2.1.1.1 Resultados del análisis granulométrico de la muestra G2.

2.2.1.2 Muestra de arena fina T3.

Tamaño tamiz	Tara tamiz	Masa de material retenido		% de mat. Retenido	% acumulado que se queda	% acumulado que pasa
		tara+peso	peso (Ri)			
4	442,4	475,98	33,58	3,36	3,36	96,64
2	515,04	649,76	134,72	13,49	16,86	83,14
1	375,99	622,45	246,46	24,69	41,54	58,46
0,5	447,44	665,29	217,85	21,82	63,36	36,64
0,25	423,26	593,48	170,22	17,05	80,41	19,59
0,125	411,46	516,72	105,26	10,54	90,96	9,04
0,063	305,66	362,69	57,03	5,71	96,67	3,33
Ciego P	487,98	494,41	6,43	0,64	97,31	2,69
			971,55	97,31		
					Modulo granulométrico	2,97

Tabla 2.2.1.2.1 Resultados del análisis granulométrico de la muestra T3.

2.2.1.3 Muestra de arena fina T8.

Tamaño tamiz	Tara tamiz	Masa de material retenido		% de mat. Retenido	% acumulado que se queda	% acumulado que pasa
		tara+peso	peso (Ri)			
4	442,4	483,13	40,73	4,08	4,08	95,92
2	514,99	642,07	127,08	12,73	16,81	83,19
1	375,98	599,29	223,31	22,37	39,18	60,82
0,5	447,39	664,37	216,98	21,73	60,91	39,09
0,25	423,26	600,6	177,34	17,76	78,67	21,33
0,125	411,45	522,47	111,02	11,12	89,79	10,21
0,063	305,69	368,2	62,51	6,26	96,05	3,95
Ciego P	487,97	495,08	7,11	0,71	96,77	3,23
			966,08	96,77		
					Modulo granulométrico	2,89

Tabla 2.2.1.3.1 Resultados del análisis granulométrico de la muestra T8.

2.2.2 Resultados de la arena gruesa.

2.2.2.1 Muestra de arena gruesa R3.

Tamaño tamiz	Tara tamiz	Masa de material retenido		% de mat. Retenido	% acumulado que se queda	% acumulado que pasa
		tara+peso	peso (Ri)			
8	536,43	539,63	0	0	0	100
4	442,43	519,01	76,58	7,69	8,01	91,99
2	515,2	791,94	276,74	27,80	35,81	64,19
1	376,07	644,56	268,49	26,97	62,78	37,22
0,5	447,52	603,51	155,99	15,67	78,45	21,55
0,25	423,26	520,07	96,81	9,72	88,17	11,83
0,125	411,46	465,71	54,25	5,45	93,62	6,38
0,063	305,68	330,02	24,34	2,44	96,07	3,93
Ciego P	487,95	490,01	2,06	0,21	96,28	3,72
			958,46	96,28		
					Modulo granulométrico	3,67

Tabla 2.2.2.1.1 Resultados del análisis granulométrico de la muestra R3.

2.2.2.2 Muestra de arena gruesa B1.

Tamaño tamiz	Tara tamiz	Masa de material retenido		% de mat. Retenido	% acumulado que se queda	% acumulado que pasa
		tara+peso	peso (Ri)			
8	536,44	538,01	0	0	0	100
4	442,39	520,48	78,09	7,84	8,00	92,00
2	515,2	802,29	287,09	28,83	36,83	63,17
1	376,07	646,79	270,72	27,19	64,02	35,98
0,5	447,47	598,68	151,21	15,19	79,20	20,80
0,25	423,31	513,52	90,21	9,06	88,26	11,74
0,125	411,46	461,52	50,06	5,03	93,29	6,71
0,063	305,69	328,67	22,98	2,31	95,60	4,40
Ciego P	487,95	489,29	1,34	0,13	95,73	4,27
			953,27	95,73		
					Modulo granulométrico	3,70

Tabla 2.2.2.2.1 Resultados del análisis granulométrico de la muestra B1.

2.2.2.3 Muestra de arena gruesa W1.

Tamaño tamiz	Tara tamiz	Masa de material retenido		% de mat. Retenido	% acumulado que se queda	% acumulado que pasa
		tara+peso	peso (Ri)			
8	536,43	538,62	0	0	0	100
4	442,4	529,79	87,39	8,78	9,00	91,00
2	515,09	805,74	290,65	29,19	38,19	61,81
1	376,02	642,7	266,68	26,79	64,97	35,03
0,5	447,46	594,53	147,07	14,77	79,75	20,25
0,25	423,27	512,2	88,93	8,93	88,68	11,32
0,125	411,46	460,82	49,36	4,96	93,64	6,36
0,063	305,66	328,71	23,05	2,32	95,95	4,05
Ciego P	487,95	489,36	1,41	0,14	96,09	3,91
			956,73	96,09		
					Modulo granulométrico	3,74

Tabla 2.2.2.3.1 Resultados del análisis granulométrico de la muestra W1.

2.2.3 Resultados de la grava.

2.2.3.1 Muestra de grava T5.

Tamaño tamiz	Tara tamiz	Masa de material retenido		% de mat. Retenido	% acumulado que se queda	% acumulado que pasa
		tara+peso	peso (Ri)			
16	589,31	589,31	0	0	0	100
8	536,4	811,44	275,04	27,55	27,55	72,45
4	442,37	1062,02	619,65	62,08	89,63	10,37
2	514,94	583,61	68,67	6,88	96,51	3,49
1	375,96	391,33	15,37	1,54	98,05	1,95
0,5	447,41	452,79	5,38	0,54	98,59	1,41
0,25	423,2	426,79	3,59	0,36	98,95	1,05
0,125	411,45	414,44	2,99	0,30	99,25	0,75
0,063	305,7	308,24	2,54	0,25	99,50	0,50
Ciego P	487,98	488,26	0,28	0,03	99,53	0,47
			993,51	99,53		
					Modulo granulométrico	6,09

Tabla 2.2.3.1.1 Resultados del análisis granulométrico de la muestra T5.

2.2.3.2 Muestra de grava T10.

Tamaño tamiz	Tara tamiz	Masa de material retenido		% de mat. Retenido	% acumulado que se queda	% acumulado que pasa
		tara+peso	peso (Ri)			
16	589,31	589,31	0	0	0	100
8	536,4	785,63	249,23	24,95	24,95	75,05
4	442,41	1077,6	635,19	63,60	88,55	11,45
2	514,94	593,96	79,02	7,91	96,47	3,53
1	376,01	393,46	17,45	1,75	98,21	1,79
0,5	447,43	452,64	5,21	0,52	98,73	1,27
0,25	423,29	426,15	2,86	0,29	99,02	0,98
0,125	411,46	414,18	2,72	0,27	99,29	0,71
0,063	305,7	308,25	2,55	0,26	99,55	0,45
Ciego P	487,98	488,2	0,22	0,02	99,57	0,43
			994,45	99,57		
					Modulo granulométrico	6,05

Tabla 2.2.3.2.1 Resultados del análisis granulométrico de la muestra T10.

2.2.3.3 Muestra de grava T7.

Tamaño tamiz	Tara tamiz	Masa de material retenido		% de mat. Retenido	% acumulado que se queda	% acumulado que pasa
		tara+peso	peso (Ri)			
16	589,31	589,31	0	0	0	100
8	536,43	786,39	249,96	25,05	25,05	74,95
4	442,37	1084,02	641,65	64,29	89,34	10,66
2	514,94	586,25	71,31	7,15	96,48	3,52
1	376,08	392,75	16,67	1,67	98,15	1,85
0,5	447,47	452,45	4,98	0,50	98,65	1,35
0,25	423,3	426,27	2,97	0,30	98,95	1,05
0,125	411,49	414,18	2,69	0,27	99,22	0,78
0,063	305,67	308,07	2,4	0,24	99,46	0,54
Ciego P	487,93	488,31	0,38	0,04	99,50	0,50
			993,01	99,50		
					Modulo granulométrico	6,06

Tabla 2.2.3.2.1 Resultados del análisis granulométrico de la muestra T7.

2.3 RESUMEN DE RESULTADOS.

A continuación se muestra un resumen de los módulos granulométricos obtenidos, así como del tamaño máximo de árido de cada tipo estos que se han analizado.

	Muestra	Módulo granulométrico	Tamaño máximo
Arena fina	G2	2,80	4
	T3	2,96	4
	T8	2,89	4
Arena gruesa	R3	3,67	4
	B1	3,69	4
	W1	3,74	4
Grava	T5	6,08	16
	T10	6,05	16
	T7	6,06	16

Tabla 2.3.1 Módulos granulométricos y tamaños máximos de áridos de las muestras analizadas.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2016/17

*ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE
CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE
HORMIGONES QUE INCORPORAN RECICLADO
DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA*

Máster en Ingeniería Industrial

Anexo 3

ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA

INDICE

3.1 INTRODUCCIÓN.....	3
3.1.1 Absorción y porcentaje de absorción de los materiales.....	4
3.1.2 Resultados del ajuste de agua.....	6

3.1 INTRODUCCIÓN.

En este anexo se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de absorción de agua de todos los materiales incorporados para la realización de los hormigones del ensayo y los ajustes del agua que son necesarios, para cada una de las amasadas que se han hecho para este trabajo.

3.1.1 Absorción y porcentaje de absorción de los materiales.

3.1.1.1 Áridos iniciales.

Grava	Material		Material después de absorción		Agua			
	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Absorción	Absorción%
	845,6	765	887	783,9	533,6	453	47	9,4
Arena fina	Material		Material después de absorción		Agua			
	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Absorción	Absorción %
	963,7	883,1	1131,5	1028,4	362,1	281,5	218,5	43,7
Arena gruesa	Material		Material después de absorción		Agua			
	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Absorción	Absorción %
	860,9	780,3	988,5	885,4	377,9	297,3	202,7	40,54

Tabla 3.1.1.1.1 Resultados de absorción para los áridos iniciales.

3.1.1.2 Materiales de sustitución.

Granalla	Material		Material después de absorción		Agua			
	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Absorción	Absorción %
	2515	2434,4	2631,6	2528,5	407,6	327	173	34,6

Escoria Sold.	Material		Material después de absorción		Agua			
	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Absorción	Absorción %
	1279,2	1198,6	1357,8	1254,7	496,2	415,6	84,4	16,88
Viruta	Material		Material después de absorción		Agua			
	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Absorción	Absorción %
	796,2	715,6	902,2	799,1	443	362,4	137,6	27,52
Cerámica	Material		Material después de absorción		Agua			
	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Absorción	Absorción %
	646,4	565,8	719,2	616,1	464,4	383,8	116,2	23,24
Hormigón reciclado	Material		Material después de absorción		Agua			
	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Absorción	Absorción %
	726,4	645,8	778,5	675,4	458,2	377,6	122,4	24,48
Loza	Material		Material después de absorción		Agua			
	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Peso + vaso	Peso	Absorción	Absorción %
	743,2	662,6	784,9	681,8	498	417,4	82,6	16,52

Tabla 3.1.1.2.1 Resultados de absorción para los materiales de sustitución.

3.1.2 Resultados del ajuste de agua.

Granalla	Absorción Blanco	Absorción Sustitución	Agua amasada en blanco (L)	Ajuste de agua (L)
	468,2	453,16	8,6	8,324
Escoria Sold.	Absorción Blanco	Absorción Sustitución	Agua amasada en blanco (L)	Ajuste de agua (L)
	468,2	425,2	8,6	7,810
Viruta CA	Absorción Blanco	Absorción Sustitución	Agua amasada en blanco (L)	Ajuste de agua (L)
	468,2	439	8,6	8,064
Cerámica	Absorción Blanco	Absorción Sustitución	Agua amasada en blanco (L)	Ajuste de agua (L)
	468,2		8,6	8,854
Hormigón Reciclado	Absorción Blanco	Absorción Sustitución	Agua amasada en blanco (L)	Ajuste de agua (L)
	468,2	483,28	8,6	8,877
Loza	Absorción Blanco	Absorción Sustitución	Agua amasada en blanco (L)	Ajuste de agua (L)
	468,2	475,32	8,6	8,731

Tabla 3.1.2.1 Resultados del ajuste de agua.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2016/17

*ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE
CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE
HORMIGONES QUE INCORPORAN RECICLADO
DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA*

Máster en Ingeniería Industrial

Anexo 4

DATOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS CON VIGAS

INDICE

4.1 INTRODUCCIÓN.....	3
4.1.1 Datos obtenidos en los ensayos con vigas.....	4

4.1 INTRODUCCIÓN.

En este anexo se muestran los resultados obtenidos en los ensayos a flexión y cortante con vigas. Estos datos son importantes y forman parte del estudio realizado para este trabajo.

4.1.1 Datos obtenidos en los ensayos con vigas.

TIPO DE VIGA	Carga (t)	1	1,5	2	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11
Blanco	Flecha (mm)	0,1	0,39	2,57	2,6	3,15	3,4	3,65	3,91	4,41	4,9	5,15	5,3	5,36	5,4	7,83	10,26	10,89	11,52
	Fisuras (mm)								<0,1	<0,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,15	1,1	1,3	1,62	2
	Carga maxima (t)	11																	
HR	Flecha (mm)	0,51	0,68	0,77	0,98	1,03	1,66	2,08	2,53	2,61	2,63	2,9	4,86	6,68	8,8	17,18			
	Fisuras (mm)							<0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,55	0,75	0,95	3,1			
	Carga maxima (t)	9,5																	
Ceramica	Flecha (mm)	0,94	1,03	1,14	1,43	1,63	1,94	2,01	2,09	2,28	2,48	3,32	5,35	6,89	8,86	9,36	11,1		
	Fisuras (mm)						<0,1	<0,1	0,1	0,15	0,15	0,25	0,35	0,6	1	1,5	1,5		
	Carga maxima (t)	10,1																	
Loza	Flecha (mm)	0,15	0,24	0,88	1,22	1,37	1,74	1,9	2,03	2,56	3,07	3,9	5,3	7,71	9,71	12,25			
	Fisuras (mm)					<0,1	0,1	0,15	0,15	0,15	0,2	0,4	0,45	0,9	0,95	1,2			
	Carga maxima (t)	9,75																	
Granalla	Flecha (mm)	0,04	0,14	0,35	0,81	1,01	1,92	2,02	2,63	2,71	3	3,9	4,84	6,62	8,67				
	Fisuras (mm)						<0,1	0,1	0,15	0,2	0,2	0,25	0,3	0,85	1				
	Carga maxima (t)	9,4																	
Escoria de soldadura	Flecha (mm)	0,19	0,22	0,69	0,75	0,86	0,9	1,04	1,11	1,7	2,28	2,46	3,29	3,89	4	9,72	10,16	11,73	
	Fisuras (mm)							0,1	0,1	<0,15	0,15	0,25	0,3	0,4	0,45	0,85	1,1	1,6	
	Carga maxima (t)	10,5																	

Anexo 4 – Datos obtenidos en los ensayos con vigas
 David Quelle Pérez

Viruta CA	<i>Flecha (mm)</i>	0,09	0,1	0,17	0,61	0,88	1,01	1,37	1,68	1,99	2,17	2,84	4,38	5,52	7	9,78	12,76		
	<i>Fisuras (mm)</i>									<0,1	0,1	0,15	0,3	0,45	0,7	1	1,6		
	<i>Carga maxima (t)</i>	10,3																	

Tabla 4.1.1.1. Resultados obtenidos en los ensayos con vigas.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

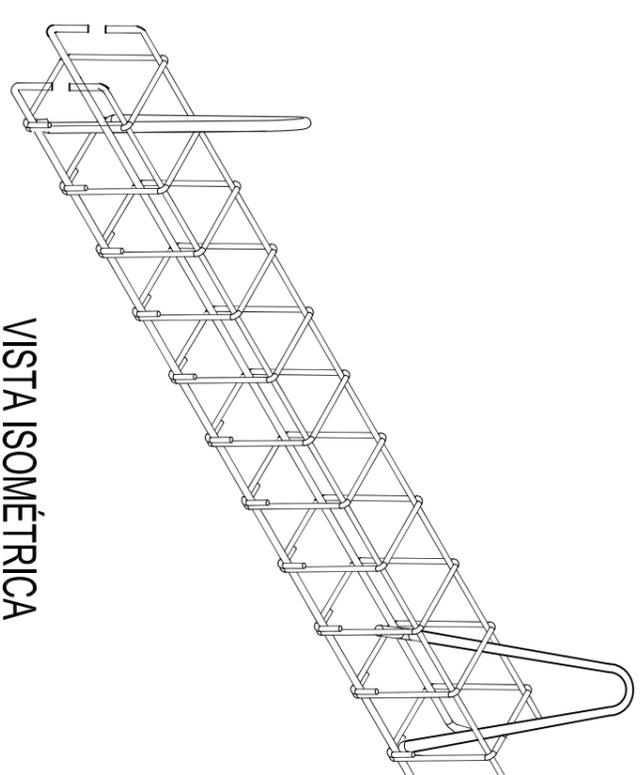
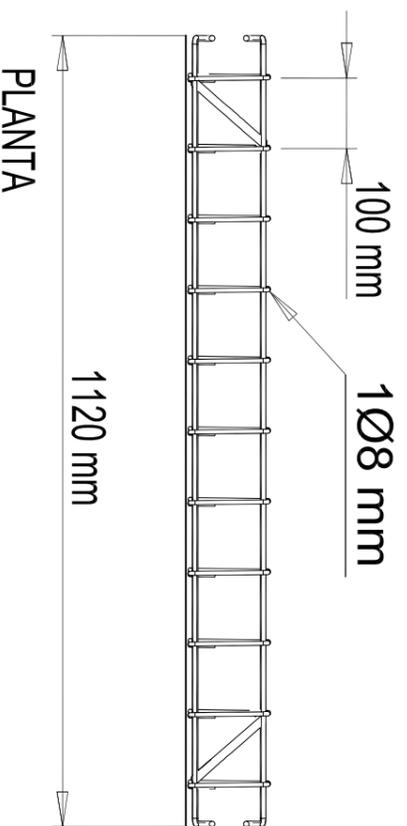
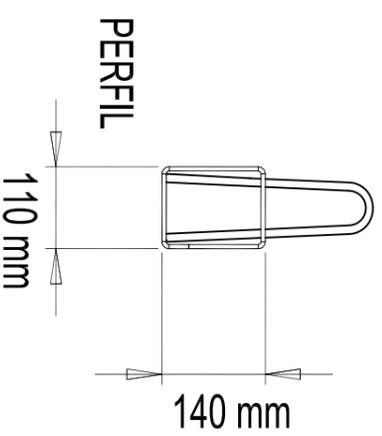
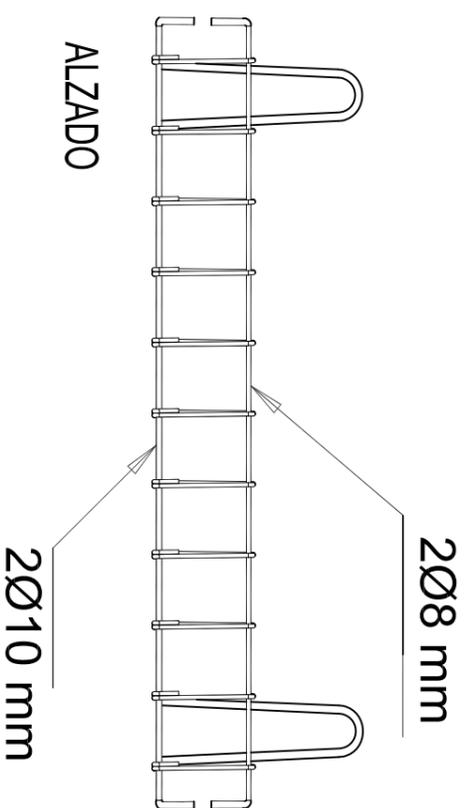
Trabajo Fin de Máster

CURSO 2016/17

*ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE
CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE
HORMIGONES QUE INCORPORAN RECICLADO
DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA*

Máster en Ingeniería Industrial

PLANOS



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TÍTULO DEL TFM:
**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE
HORMIGONES QUE INCORPORAN RECICLADO DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA**

TÍTULO DEL PLANO:
ARMADURA DE VIGA

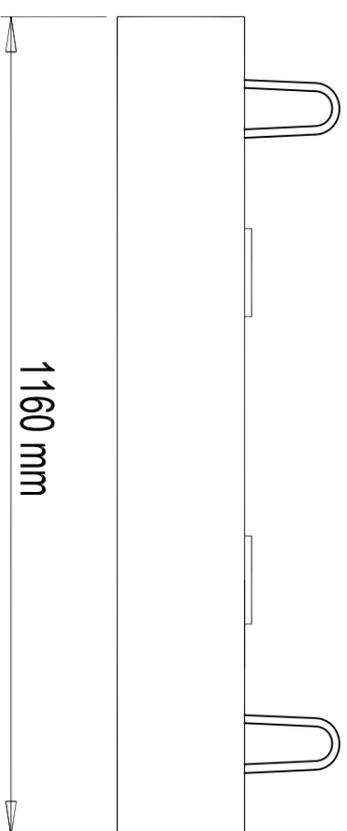
FECHA: 19-06-17

ESCALA: 1:15

AUTOR:
DAVID QUELLE PEREZ

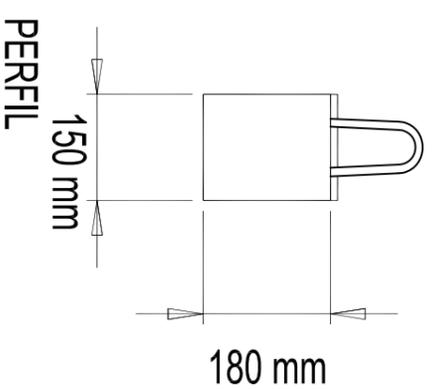
FIRMA:

PLANO Nº: 1



ALZADO

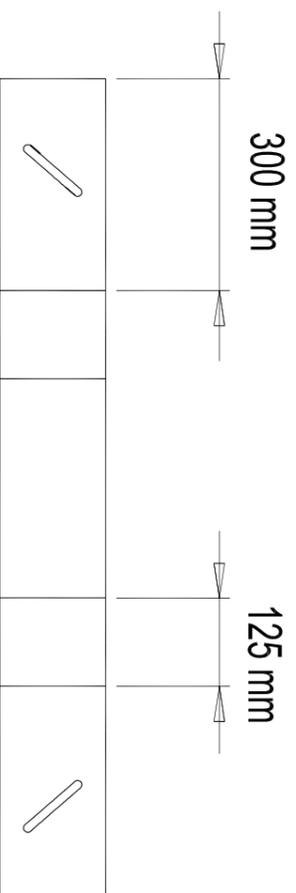
1160 mm



PERFIL

150 mm

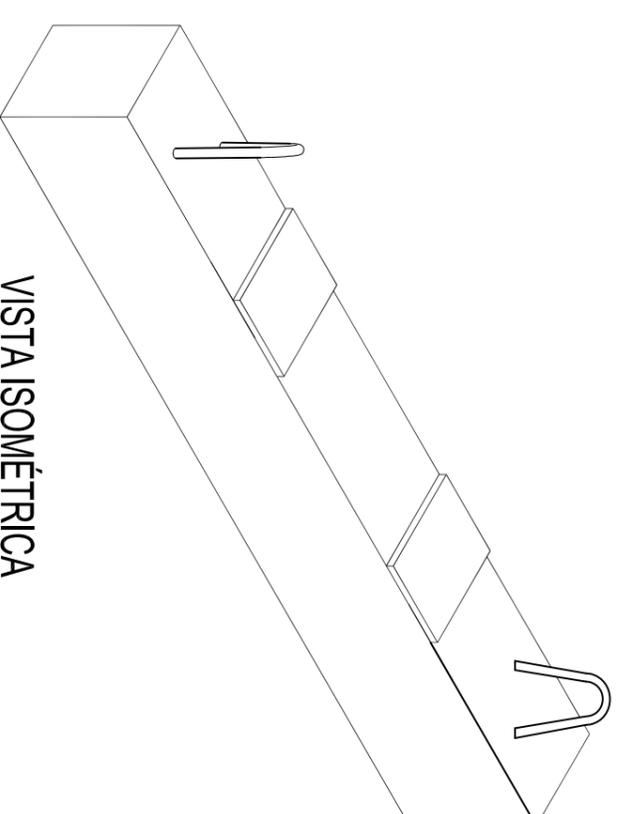
180 mm



300 mm

125 mm

PLANTA



VISTA ISOMÉTRICA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TÍTULO DEL TFM:
**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE CARACTERÍSTICAS RESISTENTES DE
HORMIGONES QUE INCORPORAN RECICLADO DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA**

TÍTULO DEL PLANO:
VIGA DE HORMIGÓN

FECHA: 19-06-17

ESCALA: 1:15

AUTOR:
DAVID QUELLE PEREZ

FIRMA:

PLANO Nº: 2