



Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

INGENIERIA DE EDIFICACIÓN

PROYECTO FINAL DE CARRERA

## DISEÑO Y DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE UN HORMIGÓN ROMANO

PROYECTISTAS: XAVIER CORBELLA ARANDA

JOAN BESTUÉ VALENZUELA

DIRECTOR: JOAN RAMON ROSELL I AMIGÓ

CONVOCATORIA: OCTUBRE 2010



## ABSTRACT

In the present document there is studied the concrete of lime, realized by means of a composition studied between different possible dosing of lime, 'chamota' and arid pertinent. The original idea of this compound was known from the times of the Phoenicians and that later was perfected by the Romans, they practised on a large scale to add to the lime cooked clay and overcoat 'puzolanas'. The most complete source for the study of the constitutive elements of the lime was Vitruvius (S.I to. C).

The aim of the study is based on the dosing of a Roman concrete for his putting on work, this has implied obtaining a compound with a mechanical certain resistance, for it we have realized a set of manometers to realize different tests, both mechanics and physicists, dividing these manometers in different series depending on the environment to which they have been exposed, the environments to which the manometers have surrendered are: dip in H<sub>2</sub>O, chamber of carbonation burst of speed and environment laboratory. Also it has been one of our aims bear in mind the environmental impact of the manufacturing process of the lime and the chamota in opposition to the current cement Portland.

From the first obtained information, in an initial study, the 'ideal' dosing decides for this compound, realizing the final manometers with this dosing, to submit them later to each of the environments already mentioned previously.

Once obtained the results of the manometers tested to compression, realized with the studied dosing, we could obtain conclusions on the hidraulicidad that contributes the chamota to the compound; the temporary difference, and therefore his mechanical resistance, which can manage to obtain a manometer that has hardened in the chamber of carbonation burst of speed with regard to one that it has done in environment laboratory. Also we could have observed up to what point it can manage to be beneficial for his mechanical and physical properties that the plotted one and hardening of the manometer realizes plunged in H<sub>2</sub>O.

After this long process, the results took us to the conclusion of which if we speak about "time", since already we knew, the chamber of carbonation accelerates the process of plotted and hardened months and enclosed years with regard to the environment laboratory; if on the other hand we speak about "resistance", we have to centre on the manometers plunged in H<sub>2</sub>O, giving these proved between one 15/20 % more than the manometers 100 % carbonated introduced in the chamber of CO<sub>2</sub>, and therefore also values very superior to those of environment laboratory.

## RESUMEN

En el presente documento se estudia el hormigón de cal, realizado mediante una composición estudiada entre diferentes dosificaciones posibles de cal, chamota y áridos pertinentes. La idea originaria de este compuesto era conocida desde los tiempos de los fenicios y que más tarde fue perfeccionada por los romanos, ellos practicaron a gran escala el añadir a la cal arcilla cocida y sobretodo puzolanas. La fuente más completa para el estudio de los elementos constitutivos de la cal fue Vitruvio (S.I a.C).

El objetivo del estudio se basa en la dosificación de un hormigón romano para su puesta en obra, esto ha implicado conseguir un compuesto con una resistencia mecánica determinada, para ello hemos realizado un conjunto de probetas para realizarles diferentes ensayos, tanto mecánicos como físicos, dividiendo estas probetas en diferentes series dependiendo del ambiente al que han sido expuestas, los ambientes a los que se han sometido las probetas son: inmersión en H<sub>2</sub>O, cámara de carbonatación acelerada y ambiente laboratorio. También ha sido uno de nuestros objetivos tener en cuenta el impacto medioambiental del proceso de fabricación de la cal y la chamota en contra del actual cemento portland.

A partir de los primeros datos obtenidos, en un estudio inicial, se determina la dosificación 'óptima' para este compuesto, realizando las probetas finales con esta dosificación, para someterlas posteriormente a cada uno de los ambientes ya mentados anteriormente.

Una vez obtenidos los resultados de las probetas ensayadas a compresión, realizadas con la dosificación estudiada, pudimos obtener conclusiones sobre la hidraulicidad que aporta la chamota al compuesto; la diferencia temporal, y por tanto su resistencia mecánica, que puede llegar a obtener una probeta que haya endurecido en la cámara de carbonatación acelerada respecto a una que lo ha hecho en ambiente laboratorio. También hemos podido observar hasta qué punto puede llegar a ser beneficioso para sus propiedades mecánicas y físicas que el fraguado y endurecimiento de la probeta se realice sumergido en H<sub>2</sub>O.

Después de este largo proceso, los resultados nos llevaron a la conclusión de que si hablamos de " tiempo", como ya sabíamos, la cámara de carbonatación acelera el proceso de fraguado y endurecido meses e incluso años respecto al ambiente laboratorio; si en cambio hablamos de "resistencia", nos tenemos que centrar en las probetas sumergidas en H<sub>2</sub>O, dando estas resultados entre un 15/20% más que las probetas 100% carbonatadas introducidas en la cámara de CO<sub>2</sub>, y por lo tanto también valores muy superiores a las de ambiente laboratorio.



## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	7	4.2.2.3 Determinación de la consistencia normal.....	27
1.1 Antecedentes históricos.....	9	4.2.3 Tipos de probetas a ensayar.....	28
2. LA PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL Y OBJETIVOS.....	11	4.2.3.1 Resistencia a compresión.....	28
2.1 El cemento Portland y el medio ambiente.....	13	4.2.3.2 Densidad aparente y relativa. Índice de porosidad.....	28
2.1.1 Consumo de energía.....	13	4.2.3.3 Resistencia a la carbonatación.....	29
2.1.2 Valorización energética.....	13	4.2.4 Realización de probetas cúbicas.....	29
2.2 La cal y el medio ambiente.....	13	4.2.5 Realización primeras probetas cilíndricas.....	31
2.3 Problemática medioambiental de la explotación.....	14	4.3 Procedimiento de las probetas cilíndricas y ensayos utilizados.....	32
2.4 La chamota y el medioambiente.....	14	4.3.1 Equipo utilizado.....	32
3. ESTADO DEL ARTE.....	17	4.3.2 Realización de probetas cilíndricas.....	33
4. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	19	4.3.3 Ensayo de asentamiento (Cono de Abrams).....	34
4.1 Materiales.....	21	4.3.4 Ensayo de porosidad y densidad.....	35
4.1.1 Cal.....	21	4.3.5 Determinación de la profundidad carbonatación.....	35
4.1.1.1 Propiedades de la cal.....	21	4.3.6 Determinación de absorción por capilaridad.....	36
4.1.1.2 Proceso de fabricación.....	22	4.3.7 Determinación de desorción por capilaridad.....	36
4.1.1.3 Definiciones y tipos de cal.....	22	4.3.8 Determinación de resistencia a compresión.....	37
4.1.2 Áridos.....	23	4.3.9 Determinación de la retracción.....	37
4.1.2.1 Propiedades geométricas.....	23	4.3.10 Difracción de rayos X (DRX).....	38
4.1.2.2 Propiedades físicas.....	24	4.4 Dosificación a estudiar.....	39
4.1.2.3 Propiedades mecánicas.....	25	5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	41
4.1.3 Chamota.....	25	6. CONCLUSIONES.....	49
4.1.3.1 Definición.....	25	7. BIBLIOGRAFÍA.....	53
4.1.3.2 Composición.....	26	8. AGRADECIMIENTOS.....	56
4.1.3.3 Proceso de fabricación.....	26	9. ANEJOS.....	60
4.2 Primeras aproximaciones.....	26		
4.2.1 Dosificación pasta cal/chamota.....	26		
4.2.2 Consistencia normal de la pasta.....	26		
4.2.2.1 Equipo.....	26		
4.2.2.2 Procedimiento.....	27		

**ÍNDICE DE IMÁGENES**

<b>Fig.1:</b> Ejecución de la primera capa de hormigón de la vuelta propuest .....	9	<b>Fig.26 y 27:</b> Ensayo sonda Vicat. Ejecución y resultado.....	27
<b>Fig.2:</b> Detalle constructivo - opus caementicium – .....	9	<b>Fig.28:</b> Probetas realizadas de pasta cal/chamota. Ambiente laboratorio.....	28
<b>Fig.3:</b> Opus cementicium en obra .....	10	<b>Fig.29:</b> Probetas realizadas de pasta cal/chamota. Carbonatación acelerada .....	28
<b>Fig.4:</b> Cantera para la explotación de la ca.....	14	<b>Fig.30:</b> Probeta refrentada con mortero de azufre .....	28
<b>Fig.5:</b> Pasta cal/chamota .....	17	<b>Fig.31:</b> Prensa con célula de carga de 5Tn con utensilios para rotura a compresión.....	28
<b>Fig.6:</b> Hidróxido cálcico utilizado ( CL-90 ).....	21	<b>Fig.32:</b> Rotura a compresión .....	28
<b>Fig.7:</b> Esquema ciclo de la cal .....	22	<b>Fig.33:</b> Probeta obtenida después de la compresión y rociada con fenolftaleína.....	28
<b>Fig.8:</b> Trabajos en cantera .....	23	<b>Fig.34:</b> Equipo necesario para ensayo de porosidad .....	29
<b>Fig.9:</b> Arena 0/5 .....	23	<b>Fig.35:</b> Muestra para ensayo de porosidad .....	29
<b>Fig.10:</b> Grava 6/12 .....	23	<b>Fig.36:</b> Molde de probeta cúbica .....	30
<b>Fig.11:</b> Grava 11/22 .....	23	<b>Fig.37:</b> Probeta cúbica (70x70x70mm) .....	30
<b>Fig.12:</b> Tamizadora .....	24	<b>Fig.38:</b> Probeta cúbica con carbonatación acelerada obtenida después de la compresión y rociada con fenolftaleína.....	30
<b>Fig.13:</b> Juego de tamices UNE .....	24	<b>Fig.39:</b> Probetas cúbicas en ambiente laboratorio .....	30
<b>Fig.14:</b> Pesos de los tamices .....	24	<b>Fig.40:</b> Prensa con célula de carga de 5Tn con utensilios para rotura a compresión.....	30
<b>Fig.15:</b> Resultado del tamizado de la arena 0/5.....	24	<b>Fig.41:</b> Probeta obtenida después de la rotura a compresión y análisis de la profundidad de carbonatación con pie de rey.....	30
<b>Fig.16:</b> Muestras del resultado obtenido con el juego de tamices UNE .....	24	<b>Fig.42:</b> Amasado manual de hormigón .....	31
(Finos, retenidos 0,063, 0,125, 0,250, 0,500, 1,00, 2,00, 4,00, y 8,00mm de obertura de la malla)		<b>Fig.43:</b> Limpieza y aplicación de desencofrante en moldes cilíndricos .....	31
<b>Fig.17:</b> Chamota presentada en sacos de 25kg por proveedor.....	25	<b>Fig.44:</b> Diferentes probetas obtenidas, de distintos tamaños y formas.....	31
<b>Fig.18:</b> Chamota.....	25	<b>Fig.45:</b> Cono de Abrams utilizado .....	31
<b>Fig.19:</b> Material utilizado para la fabricación de la chamota .....	25	<b>Fig.46 y 47:</b> Material utilizado para el amasado .....	31
<b>Fig.20:</b> Horno de cocción Salt del Matxo.....	26	<b>Fig.48:</b> Preparación probeta cilíndrica .....	32
<b>Fig.21:</b> Amasadora Matest .....	26	<b>Fig.49:</b> Hormigonera GUY-NOEL .....	32
<b>Fig.22 y 23:</b> Amasado y resultado de la pasta cal/chamota .....	27	<b>Fig.50:</b> Características técnicas de la hormigonera GUY-NOEL.....	32
<b>Fig.24:</b> Ensayo sonda Vicat. Calibrado inicial.....	27	<b>Fig. 51:</b> Vibrador de aguja, MATEST .....	32
<b>Fig.25:</b> Ensayo sonda Vicat. Llenado y enrasado del molde.....	27		

<b>Fig.52:</b> Herramientas para el hormigonado .....	32
<b>Fig.53:</b> Bascula .....	32
<b>Fig.54:</b> Moldes a utilizar .....	33
<b>Fig.55 y 56:</b> Nacido de hormigón en carretilla .....	33
<b>Fig.57, 58 y 59:</b> Llenado, vibrado y enrasado de probetas.....	33
<b>Fig.60:</b> Cono de Abrams mojado .....	34
<b>Fig.61, 62, 63 y 64:</b> Realización cono de Abrams .....	34
<b>Fig.65:</b> Ensayo de porosidad.....	35
<b>Fig.66:</b> Aplicación de silicona en la parte superior de probeta cilíndrica.....	35
<b>Fig.67, 68, 69 y 70:</b> Ensayo de profundidad de carbonatación en probeta cilíndrica.....	35
<b>Fig.71:</b> Medición de profundidad de carbonatación .....	35
<b>Fig.72, 73 y 74:</b> Ensayo capilaridad .....	36
<b>Fig.75:</b> Probeta sumergida para su posterior desorción .....	36
<b>Fig.76 y 77:</b> Peso hidráulico de las probetas .....	36
<b>Fig.78, 79, 80 y 81:</b> Refrentado de probetas con mortero de azufre.....	37
<b>Fig.82:</b> Probeta refrentada .....	37
<b>Fig.83:</b> Rotura a compresión .....	37
<b>Fig. 84, 85 y 86:</b> Retracción del hormigón.....	38
<b>Fig.87:</b> Equipo DRX ....	38
<b>Fig.88:</b> Rebote de la radiación y ángulo de difracción .....	38
<b>Fig.89:</b> Resultado gráfico del DRX de la chamota.....	38
<b>Fig.90:</b> Probetas sumergida.....	39
<b>Fig.91:</b> Probetas en ambiente laboratorio .....	39
<b>Fig.92:</b> Probetas en cámara de CO <sub>2</sub> .....	39





## 1. INTRODUCCIÓN

Antecedentes históricos

## 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto final de carrera aporta datos y conclusiones a partir de un diseño experimental de un hormigón romano, realizándole a este ensayos de diferentes tipos con el objetivo de poder llevarlo a cabo en una bóveda de una obra en una masía situada en Porqueres (Girona), por causas ajenas, este hormigón romano no llegó a su fase de puesta en obra debido a un cambio de parecer de los propietarios, ya que paso de ser una propiedad donde **ellos iban a residir a una propiedad en venta.**



Debido a esta situación nos hemos visto obligados a cambiar parte de este proyecto, realizando así un trabajo más dedicado y especializado del material en el laboratorio.

### 1.1 Antecedentes históricos.

La técnica era conocida desde los fenicios, como lo demuestran los pavimentos, de los lugares arqueológicos de Selinunte y Solunto en Sicilia, pero fue perfeccionado por los romanos (opus signinum) que utilizaron el cocciopesto como impermeabilización (para revestimiento, para las paredes de los tanques o para mampostería).

El cocciopesto está presente en los edificios históricos de la arquitectura de varias ciudades italianas como mortero para albañilería, pero principalmente, se ha utilizado tanto para la capa base como para la capa de acabado de revocos, especialmente indicado para ambientes húmedos con alta capacidad de transpiración.

De hecho una de las ciudades donde su uso era más común en los siglos pasados es Venecia, además de Treviso, Livorno, Roma y muchos otros. La tecnología es similar a la de los más caros (marmolina) en la que los granulos de los ladrillos fue sustituido por el polvo de ladrillo y astillas de mármol.

También fue utilizado como un componente para la pavimentación, incluso en medios húmedos, como base para mosaicos y decoraciones en el renacimiento, como del veneciano terrazo, o para cuerpos de relieve en estucos.

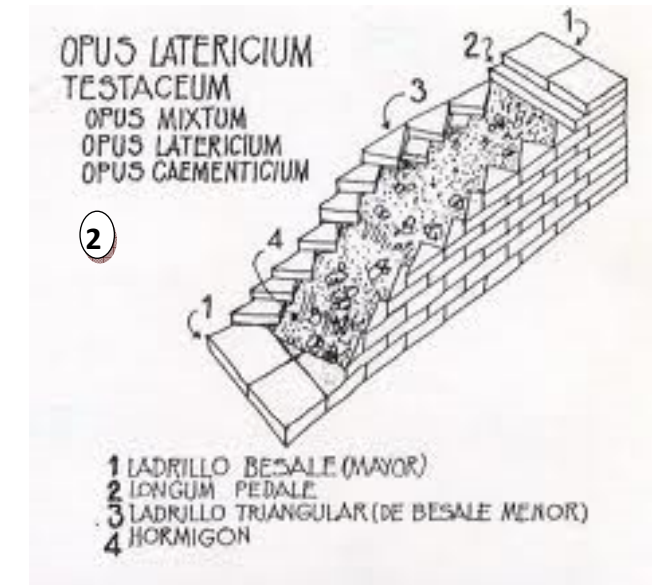
En la actualidad se han producido industrialmente granulos obtenidos por trituración de ladrillos suaves (cocidos a temperaturas por debajo de 850 °C), clasificándolos en varios tamaños de partículas. El material, formado con cal hidráulica natural, cal y arena, se mezclan con una tendencia cada vez mayor, por sus características técnicas que lo hacen especialmente adecuado no sólo para la recuperación del parque de viviendas históricas, sino también para "la construcción biocompatible". La civilización romana mejoró los procesos de fabricación de la cal y las técnicas de la puesta en

práctica de los hormigones, y supo explotar todas las posibilidades de este material y además popularizaron y expandieron esta técnica por todo el imperio.

Una de las más antiguas menciones del Opus caementicium encontrada la cita Catón (s.II a. J.C.), que describe la construcción de "ex calce et caementis". La fecha exacta de introducción del mortero de cal en Roma no se conoce, pero se sabe que esta técnica fue utilizada en los dos últimos siglos de la república (s.II y I a. J.C.), en que se desarrolla y generaliza rápidamente, supliendo los sistemas utilizados anteriormente, tales como el Opus Quadratum (gruesos bloques ajustados sin mortero) y el Opus Latericium y el Later Crudus o ladrillos secos.

Vitruvio es la fuente más completa para el estudio de los elementos constitutivos del mortero de cal (s. I a. J.C.). Por él sabemos que la mezcla de los materiales se hacía en proporción de una unidad de cal por tres de arena o dos por cinco, según la calidad de la arena. Menciona también en sus artículos el empleo de aditivos ya utilizado por los griegos tales como cenizas volcánicas o la teja picada.

En efecto, los romanos han practicado a gran escala el añadir a la cal arcilla cocida y sobretodo puzolana (roca volcánica que procede de los yacimientos descubiertos en Puzzoli, cerca de Nápoles), que confiere al mortero propiedades hidráulicas. Otra característica de la composición es la excepcional calidad del mortero romano en el cual se tiene mucho cuidado al mezclar sus elementos constitutivos este mortero se ha utilizado masivamente para cubrir las mamposterías de las paredes. También lo vierten entre dos muros paralelos, que hace de encofrado perdido. Toda esta masa era aplastada con mazas para rellenar todos los intersticios hasta eliminar la última burbuja de aire.



La excepcional calidad de los morteros romanos ha pasado a la leyenda, se suponía que era debido a secretos de fabricación y usos de aditivos.

La utilización de aditivos especiales como albúmina, caseínas y aceite en otros casos han sido siempre comentados en las leyendas esotéricas de las calces romanas, pero la realidad es que su buena elaboración, el perfecto cocido de las calizas, su buen apagado, la homogeneidad de las dosificaciones y la cuidadosa ejecución ha sido el secreto fundamental de su realización y lo que ha permitido que conozcamos su legado tras los dos mil años que nos separan.

Tras la desmembración del Imperio se pierde esta unidad formal de calidad, quizá aportada por las disciplinadas Legiones, que transmitían a lo largo del Imperio, como una rígida ordenanza, lo que hoy llamaríamos normativa, todo el buen hacer del proceso.

Un capítulo importante es también el uso de estucos en la antigüedad que se desarrolla en el mundo romano, unas de las muestras más significativas se encontraron en Pompeya y Herculano. Es un arte derivado directamente del helenístico.

Las casas de la antigüedad, construidas en general por débiles muros, sus terminaciones eran

generalmente revestidas de cal, tanto el exterior como el interior. Vitruvio ya recomendaba superponer tres capas de mortero de cal y otras tres de estuco de mármol. El grueso del estuco variaba de 5 a 8 cm. Estos estucos eran decorados con pintura al fresco, esto es, aplicar pigmentos diluidos en agua de cal sobre la capa de mortero de cal aún sin fraguar, distribuyendo la obra en tajos o tareas en que el pintor era capaz de decorar antes del fraguado. En algunos aún se observa la huella del pincel por estar el mortero aún demasiado plástico. Algunas veces se retocaba “in secco” sobre el paramento ya fraguado, pero con temperas.

Los estucos son los revocos de más calidad en los acabados de fábricas, sean de yeso, cal o mezcla de ambos.

Los beneficios que otorga la cal en los morteros han sido descritos y reconocidos por los constructores en todas las épocas. Los primeros indicios de la utilización de la cal (y de los morteros, por tanto) se remontan, según parece, a la época de los egipcios, puesto que los bloques de la pirámide de Keops fueron unidos y sellados con cal. Plinio, a su vez, menciona cómo los griegos usaron éste material en la construcción del templo de Apolo. Pero fueron los romanos los que hicieron extensivo el uso de la cal para la construcción de grandes obras y monumentos que todavía perduran, lo que da una idea de la eficiencia, durabilidad y calidad de aquellos morteros tradicionales. Por ejemplo, Vitruvio, en Los Diez Libros de Arquitectura, dice que “elegida la mejor arena para el mortero, se ha de poner no menor diligencia en la cal, haciéndola de piedra blanca o de pedernal. La de piedra densa y dura será mejor para fabricar; la de piedra más porosa, para los revoques”.



Durante la Edad Media y el Renacimiento, la cal se consolida como elemento de construcción. También, en otros continentes, se utilizó la cal en la construcción tradicional, como los mayas e incas en América o los chinos en Asia. De hecho, uno de los primeros ejemplos de utilización de morteros de revoco en las paredes de las viviendas se da en Cayönü, poblado situado al sur de Turquía y con nueve mil años de antigüedad.

Sin embargo, no es hasta el s.XVIII cuando el químico británico Joseph Black expuso la primera explicación moderna de la calcinación con su trabajo “experimentos sobre la magnesia alba, cal viva y otras sustancias alcalinas”, donde se observa que la cocción de tiza y piedra caliza generaba dióxido de carbono. También que el mortero de cal apagada, al estar expuesto al aire, lentamente se endurecía debido a que ganaba  $\text{CO}_2$  y perdía agua dando lugar a algo similar a la piedra caliza original.

A partir de entonces, el uso de la cal evoluciona a gran velocidad, aunque su expansión se frena a por la utilización del cemento como conglomerante, debido principalmente a la mayor rapidez con la que desarrolla las resistencias. No obstante, aunque en la actualidad el cemento, como ya se comentó, sigue siendo el conglomerante principal de los morteros, la cal continúa añadiéndose en casi todos los tipos de mortero debido a sus propiedades.

## 2. LA PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS

Problemática medioambiental de la explotación

La cal y el medio ambiente

El cemento Portland y el medio ambiente

La chamota y el medio ambiente

## 2. LA PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS

La problemática actual del hormigón realizado con cemento portland, es su gran poder de contaminación, uno de nuestros objetivos es intentar hallar un hormigón sustitutivo en la medida de lo posible, a base de cal y chamota que sea más respetuoso con el medio ambiente.

### 2.1 El cemento Portland y el medio ambiente.

#### 2.1.1 Consumo de energía.

Esta temática tiene muy variadas implicaciones, desde el propio consumo energético, desde el punto de vista de la empresa, hasta su relación con las emisiones de CO<sub>2</sub>, pasando por otros aspectos como la incineración de residuos industriales.

El consumo de energía en una planta de cemento, teniendo en cuenta todos los procesos involucrados (trituration, molienda, hornos, etc.), es realmente gigantesco (por cada tonelada de crudo que entra en el horno se necesitan, aproximadamente, ochenta kilogramos de combustible), por lo que uno de los objetivos de las cementeras ha sido, desde siempre, el minimizar el gasto energético. Y esto no solo por cuestiones medioambientales (los combustibles suelen ser del tipo carbón o derivados del petróleo, es decir, energías no renovables), sino también por la propia eficiencia económica del proceso de fabricación, ya que la factura energética es uno de los principales costes en la obtención del cemento (alrededor del 30% del coste final del producto).

Otro aspecto relacionado con el consumo de combustibles fósiles es la emisión de CO<sub>2</sub>. Evidentemente, las fábricas de cemento no son, ni mucho menos, las únicas productoras de este compuesto, pero sí aportan una parte, no desdeñable, de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (la producción de una tonelada de clínker, entre la calcinación de las calizas y la combustión del carbón en el horno, genera aproximadamente una tonelada

de CO<sub>2</sub> que va a parar a la atmósfera). El protocolo de Kioto limita estas emisiones para el futuro y, aunque sus propuestas, probablemente, no se lleguen a cumplir (limitación del aumento de las emisiones de los gases del efecto invernadero, entre ellos el CO<sub>2</sub>, a un 15%, sobre los niveles de 1990, en el periodo 2008-2012), las empresas cementeras en los países desarrollados han sido uno de los segmentos de la industria que más han colaborado en la obtención de estos objetivos.

El enfoque para la disminución de la emisión de CO<sub>2</sub> es múltiple. Por un lado, la inclusión de mayores cantidades de adiciones en el clínker, con lo que para producir una cantidad determinada de cemento se necesita, al aumentar las adiciones, menor proporción de clínker y, por tanto, un menor consumo energético. Por otro lado, estas adiciones, en ocasiones, proceden de desechos industriales, ayudando así a resolver el problema de eliminación de estos residuos. Además, las fábricas de cemento utilizan también combustibles alternativos, con una amplia gama que va desde los aceites, pinturas o neumáticos hasta papel o plásticos. De esta forma, se eliminan estos desechos industriales y se envían a la atmósfera menores cantidades de CO<sub>2</sub>. Bien es verdad que esta sustitución se lleva a cabo muy desigualmente en la Unión Europea, pues en países como Holanda, Suiza o Austria la sustitución supera el 50% del total del consumo energético, mientras que en otros, como Italia, Gran Bretaña o la propia España, la proporción no alcanza el 10% (Suecia, Alemania, Francia o Bélgica están entre el 25 y el 35%).

#### 2.1.2 Valorización energética.

Con relación a la utilización de combustibles alternativos procedentes de residuos industriales, no hay que olvidar que en las sociedades modernas se generan grandes cantidades de este tipo de productos, necesitando, pues, una correcta gestión y planteándose, como alternativa muy provechosa, la denominada valorización de residuos, es decir, su

uso aprovechando las materias primas (reciclado) o los recursos energéticos incluidos en ellos. En el caso de las fábricas de cemento, la utilización de los contenidos energéticos presentes en los citados desechos industriales constituye una oportunidad con un gran potencial tanto para la propia fábrica en sí como para la sociedad en su conjunto, siendo además esta valorización perfectamente viable y útil desde un punto de vista económico, técnico y medioambiental.

La utilización de residuos como materia prima en la fabricación del cemento aporta las siguientes ventajas medioambientalmente hablando: (1) disminuye la ocupación en los vertederos; (2) reduce la explotación de las canteras al sustituir productos naturales por residuos, (3) disminuye el consumo energético y (4) reduce las emisiones a la atmósfera.

Los residuos pueden ser de muy diferente tipo, siendo los energéticos los más modernos en cuanto a su utilización se refiere, pues los residuos industriales aprovechables como materias primas para el proceso de fabricación hace mucho tiempo que se incorporan en el proceso productivo. Ejemplos serían los lodos de papelera, las arenas de fundición o los residuos de demolición (incluyendo los hormigones reciclados), para la preparación del crudo, o las escorias de horno alto, las cenizas volantes de central térmica o el humo de sílice de la industria de las ferroaleaciones para acompañar al clínker en la molienda. Los subproductos procedentes del proceso de fabricación de papel a partir de papel usado también pueden tener su importancia energética.

La valorización energética persigue la sustitución de las materias primas clásicas, como el coque de petróleo o el carbón, por otras formadas por residuos industriales que poseen componentes orgánicos en su composición. Las ventajas de esta valorización son múltiples, pudiéndose citar, entre otras, las siguientes: (1) evita el vertido de residuos

y su impacto asociado; (2) ahorra combustibles no renovables; (3) trata de forma segura los residuos utilizados y aprovecha al máximo su factor energético y (4) disminuye globalmente las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, pues en cualquier caso estos desechos serían incinerados o fermentados en el vertedero.

Los principales combustibles alternativos utilizados para ese fin son, por este orden, las harinas y grasas animales, los neumáticos usados, los disolventes y productos similares, los aceites usados y productos similares, los serrines y los lodos de depuradora, generando una cantidad, durante 2005 de más de 250.000 toneladas. Sin embargo, una línea de trabajo que se está desarrollando es la posible influencia de la utilización de este tipo de combustibles alternativos en las propiedades del clínker.

### 2.2 La cal y el medio ambiente.

En la producción de la cal suelen utilizarse entre 1.400 y 2.200 kg de caliza por tonelada de cal viva comercial. El consumo depende del tipo de producto, de la pureza de la caliza, del grado de calcinación y de la cantidad de productos residuales. La mayor parte de la materia restante se pierde en el proceso en forma de emisiones atmosféricas de dióxido de carbono.

El sector de fabricación de cal tiene un gran consumo de energía, que representa hasta el 50% de los costes totales de producción. Los hornos se alimentan de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. El consumo de gas natural ha registrado un notable aumento durante los últimos años. En 1995, los combustibles más utilizados eran el gas natural (48%) y distintos tipos de carbón, como la antracita, el coque, el lignito y el coque de petróleo (36%) seguidos del petróleo (15%) y otros combustibles (1%). También en 1995, había en total unas 240 instalaciones productoras de cal en la Unión Europea (sin contar la producción cautiva) y 450 hornos, la mayoría de los hornos de cuba

regenerativos de flujo paralelo y de otros tipos, con una capacidad de entre 50 y 500 toneladas diarias. Los principales problemas medioambientales relacionados con la producción de cal son la contaminación atmosférica y el consumo de energía. El proceso de calcinación es la principal fuente de emisiones y también el principal consumidor de energía. Los procesos secundarios de apagado y trituración también pueden ser importantes en este aspecto. Las principales emisiones son de polvo, óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO). Muchas fábricas de cal han adoptado medidas primarias generales, como la optimización del control de procesos. Estas medidas suelen aplicarse para mejorar la calidad del producto y reducir los costes de producción, pero también reducen el consumo de energía y las emisiones atmosféricas. Las mejores técnicas disponibles para reducir las emisiones de polvo combinan las medidas primarias generales con la eliminación eficiente de las partículas procedentes de fuentes puntuales a través de filtros textiles, precipitadores electrostáticos o depuradores de proceso húmedo. El nivel de emisiones asociado a la aplicación de estas MTD se sitúa en torno a los 50 mg de polvo por m<sup>3</sup>. Las mejores técnicas disponibles también incluyen la reducción y prevención de las emisiones de polvo procedentes de fuentes fugitivas.

Las mejores técnicas disponibles para reducir los residuos son el aprovechamiento del polvo, la cal viva de calidad no conforme y la cal hidratada en determinados productos comerciales.

Las emisiones de NOx dependen principalmente de la calidad de la cal que se produce y del diseño del horno. En algunos hornos rotativos se han instalado quemadores especiales para reducir estas emisiones, pero no se han aplicado otras tecnologías de reducción de NOx en la industria de fabricación de cal.



Las emisiones de SO<sub>2</sub>, procedentes principalmente de los hornos rotativos, dependen de la proporción de azufre que contiene el combustible, del diseño del horno y del azufre que debe contener la cal producida. Por lo tanto, las emisiones de SO<sub>2</sub> pueden limitarse utilizando combustibles bajos en azufre y fabricando cal con mayor proporción de azufre. También hay técnicas de adición de absorbentes, pero actualmente no se aplican en este sector.

### 2.3 Problemática medioambiental de la explotación de los áridos

La problemática medioambiental de la explotación es igual para los dos tipos de hormigones, para el hormigón del tipo convencional y para el hormigón de cal y chamota, ya que los dos utilizan áridos de machaqueo, de todos modos hemos creído importante hablar de este tipo de contaminación producido por la explotación.

Las explotaciones de áridos, tanto en canteras como en graveras, aunque especialmente en estas últimas, presentan una problemática, desde el punto de vista medioambiental, que las hace ciertamente diferentes al resto de explotaciones mineras. Estas características definitorias se pueden

agrupar, básicamente, en dos grupos: las asociadas al hecho de una explotación intensiva y, en el caso de las graveras, las relacionadas con la explotación por debajo del nivel freático. En cuanto al primer tipo, no hay que olvidar que las explotaciones de áridos extraen un material de uso común en la industria i que, por tanto, su producción es muy superior a la de cualquier otro recurso mineral.

Esto hace que cualquier núcleo urbano, y más si se trata de una gran ciudad, lleve aparejado un gran número de explotaciones de áridos en sus cercanías, sobre todo teniendo en cuenta el bajo precio del producto y el encarecimiento que genera su transporte. Por ello, la definición en un marco general que controle esta gran cantidad y dispersión de explotaciones resulta fundamental.

Por otro lado, cuando la explotación de la materia prima se produce por debajo del nivel freático, caso de las graveras en general, se producen toda una serie de impactos específicos que deben ser analizados y controlados correctamente.

Esta problemática que afecta muy específicamente a las explotaciones de áridos, a tenido respuesta de forma muy variada en los países desarrollados, más involucrados del tema de la conservación del medioambiente. La resolución, o al menos la minimización, de la citada problemática se suele encauzar a través de tres vías:

- Incentivando el uso de materiales reciclados, es decir, de productos ya utilizados en el proceso industrial, disminuyendo la explotación en cantera o gravera.
- Impidiendo, cada vez en mayor grado y a través de la correspondiente legislación, el desarrollo de explotaciones a cielo abierto con la consecuente derivación hacia un predominio de la minería subterránea. Esta tendencia, muy difícil de plantear en la actualidad por los costes asociados a la minería subterránea, acabará imponiéndose, sobre todo en aquellas

ciudades en las que la presión medioambiental derivada del uso de los áridos haga casi inviable la concesión de permisos para la apertura de nuevas explotaciones.

- Estableciendo un fuerte control administrativo y económico en las labores de restauración. En el caso de las explotaciones vigentes la solución puede ir por el camino de la restauración de los huecos existentes, bien, por ejemplo, para su uso agrícola dejando el terreno prácticamente igual a como se encontraba antes de la explotación, o bien para su uso recreativo. Para esta segunda opción, los lagos generados en la explotación de los áridos por debajo del nivel freático pueden convertirse en lugares de recreo (áreas de paseo, zonas de observación de aves, etc.).

### 2.4 La chamota y el medioambiente

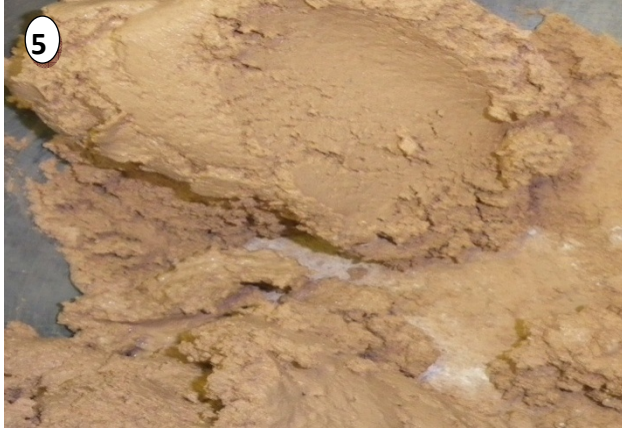
El proceso de fabricación de la chamota, se basa en la trituración de piezas cerámicas que no han sido bien cocidas y que no han acabado en obra por alguna deficiencia; normalmente en el proceso de cocción, es por esto que el consumo energético y contaminación producida en este proceso no se tiene en cuenta, ya que la chamota proviene del aprovechamiento de piezas cerámicas deficientes que no tendrían uso en obra. Este proceso de fabricación y trituración se lleva a cabo en la empresa CERÀMIQUES SALT DEL MATXO, SCP. Así, solo tendríamos que tener en cuenta el consumo energético de la trituradora y la contaminación producida en este proceso.

### 3. ESTADO DEL ARTE

Conocimientos de anteriores estudios

### 3. ESTADO DEL ARTE

A día de hoy se conocen muchas propiedades y características de esta mezcla (cal-chamota), pero siempre encaradas a posibles morteros de restauración.



Se han desarrollado morteros que tienen las características de los morteros de cal pero con propiedades hidráulicas, estos morteros, aunque ya fueron utilizados por los romanos, han caído en desuso. Estos morteros se han adicionado con chamota o polvo de ladrillo, que actúa aportando hidráulica a los morteros de cal presentando la ventaja adicional de ser una adición de bajo coste. Existen estudios de distintos tipos de morteros de cal, chamota, arena y agua, variando las dosificaciones y las características de la adición - temperatura de cocción y finura de molido-, estudiando su hidráulica y la evolución de las propiedades mecánicas y físicas relacionando todas las variables y comprobando cómo evolucionan a lo largo del tiempo y cómo influyen cada una de ellas, estudiadas individual y conjuntamente. Para ello, además de los ensayos convencionales de dureza, resistencias a flexión y compresión, etc., se ha desarrollado un ensayo físico de hidráulica. Asimismo se ha comprobado la fiabilidad de los ensayos mediante un estudio estadístico y se ha llegado a una relación entre las distintas propiedades físicas y mecánicas de los morteros realizados. También existen estudios sobre ensayos

con análisis microestructurales y mediante DRX para constatar la formación de compuestos hidráulicos y conocer la interfase formada en dichos compuestos. Los estudios obtienen dosificaciones concretas para obtener morteros hidráulicos con buenas propiedades físicas y mecánicas, dejando abiertas futuras líneas de investigación.

Como se ha dicho anteriormente, el objeto de estos estudios es la obtención de morteros de cal y chamota con propiedades hidráulicas. Ello se basa en la actividad puzolánica.

Se consideran generalmente como puzolanas los materiales que, carentes de propiedades cementicias y de actividad hidráulica por sí solos, contienen constituyentes que se combinan con la cal a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables, que se comportan como conglomerantes hidráulicos.

La reactividad de los materiales puzolánicos se atribuye fundamentalmente en algunos casos, a la Sílice Activa que se encuentra en ellos formando compuestos mineralógicos silíceos.

La actividad puzolánica responde a un principio basado en la que la sílice y la alúmina, como componentes ácidos de los materiales puzolánicos, reaccionen con la cal a condición de que sus uniones en dichos materiales sean lábiles.

Entre otros casos en los que se da la necesaria labilidad de estas uniones están los Materiales Activados y a estos pertenece la chamota o polvo de ladrillo cocido, que se puede considerar como puzolanas artificiales debido al tratamiento térmico que han sufrido las arcillas para la obtención de los ladrillos.



#### 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Materiales

Primeras aproximaciones

Procedimiento de las probetas cilíndricas y ensayos utilizados

Dosificación a estudiar

#### 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo el proceso experimental, se ha elaborado un estudio para determinar un número aproximado de probetas para realizar los ensayos, y de esta manera saber cuál es la cantidad necesaria de cada material para la realización de estas, y así poder concretar el encargo a los proveedores.

##### 4.1 Materiales

Para la realización de las probetas hemos utilizado 4 materiales y agua, estos son: cal, gravas, arena y chamota.

##### 4.1.1 Cal

La cal utilizada en este proyecto proviene de la fabrica y almacén situados en Pacs del Penedés donde se encuentra la empresa CALES DE PACHS, S.A.

A continuación adjuntamos la ficha técnica de propiedades y características de la cal elegida para realizar el proyecto, que se trata de un hidróxido cálcico -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - CL-90.



### HIDROXIDO CALCICO CL 90-S Ficha técnica de producto

IDENTIFICACIÓN			
Nombre Químico:	HIDRÓXIDO CALCICO	Fórmula Química:	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Nº de registro CAS:	1305 - 62 - 0 (Chemical Abstract Service Registry Number)	Estado Físico:	Polvo fino.
Nº EINECS:	215 - 137 - 3 (European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances)	Peso Molecular:	74,08
		Nombre Común:	Cal apagada
		Denominación Normalizada:	CL 90-S
		Fabricado en:	Pacs del Penedés (Barcelona)

CONSTITUYENTES	
Sustancia de un solo componente, HIDROXIDO DE CALCIO, con pequeños porcentajes de $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , $\text{MgO}$ y $\text{CO}_3\text{Ca}$ , procedentes de la materia prima caliza de carácter natural.	
Producto natural obtenido por mezcla de óxido de calcio y agua.	

PROPIEDADES GENERICAS			
Aspecto:	Polvo blanco inodoro.		
pH:	12,4 en solución saturada a 25°C		
Tº descomposición:	580 °C formando óxido de calcio y agua.		
Peso específico:	2,20 Kgs/l a 20 °C		
Solubilidad:	Soluble en ácidos, glicerina y soluciones de sacarosa.		
	Ligeramente soluble en agua:	A 0 °C	1,85 Kg/m <sup>3</sup>
		A 20 °C	1,65 Kg/m <sup>3</sup>
		A 100°C	0,71 Kg/m <sup>3</sup>
Reactividad:	Reacción exotérmica con ácidos para formar sales de calcio.		

PRESENTACIÓN Y SUMINISTRO	
Sacos:	De válvula. 2 hojas de papel Clupak (exterior blanca) de ≈ 20 kgs.

APLICACIONES	
Producto utilizado en: agricultura y ganadería, industria y medio ambiente para ajuste de pH y dureza de aguas, remineralización, eliminación de metales pesados, tratamiento de fangos de depuradoras (EDAR) y en general para aguas de consumo, aguas industriales o residuales. En incineradoras RSU y centrales térmicas para tratamiento de gases.	
La cal se usa como: neutralizante, fundente, caustificante, lubricante, secante, cementante, absorbente, precipitante, desinfectante, impermeabilizante y por supuesto como materia prima.	

NORMATIVA	
UNE-EN 459 - Partes 1,2 y 3	"Cales para la construcción".
UNE-EN 12518	"Productos químicos utilizados en el tratamiento del agua destinada al consumo humano - Cal".

CARACTERÍSTICAS QUIMICAS			CARACTERÍSTICAS FISICAS		
	Valor medio	Desviación		Valor medio	Desviación
o CaO + MgO	91,50%	±1,10	GRANULOMETRIA:		
o CO <sub>2</sub>	1,40%	±0,13	o Retenido a 200 μ	0,00 %	±0,01
o Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20%	±0,05	o Retenido a 90 μ	0,02 %	±0,01
o Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,60%	±0,05			
o SiO <sub>2</sub>	0,80%	±0,15	DENSIDAD APARENTE:	380 gr/l.	10 gr/l
o H <sub>2</sub> O humedad	1,20%	±0,36			
o Ca(OH) <sub>2</sub> util	89,50%	±1,50			

Debido a la importancia que supone la cal en este proyecto hemos creído necesario darle una especial relevancia, y así lo hemos hecho en los siguientes apartados.

##### 4.1.1.1 Propiedades de la cal.

- **Plasticidad:** ésta propiedad, y por tanto la trabajabilidad, es mayor en un mortero con cal que si solo lleva cemento, debido a la mayor capacidad de retener el agua que presenta la cal en comparación con el cemento. Esta mejora de la propiedad es muy importante para los morteros bombeables o de proyección con máquina.
- **Hidrofugante:** aunque se suelen añadir hidrofugantes al mortero, la cal se puede considerar como el mejor hidrofugante natural.
- **Deformable:** los morteros con cal, sobre todo si van a estar expuestos a bruscos cambios climáticos, presentan una mayor capacidad de sufrir deformaciones sin agrietarse.
- **Durabilidad:** los morteros con cal, al disminuir la penetración del agua, minimizan los efectos perniciosos de las heladas.
- **Adherencia:** la adición de la cal mejora esta propiedad en el mortero.
- **Lentitud de endurecimiento:** los morteros que llevan cal son más lentos a la hora de fraguar, por lo que se les considera más flexibles y manejables durante más tiempo.
- **Disminución de la resistencia en el mortero endurecido:** la utilización de morteros con gran resistencia en estado endurecido suele inducir la presencia de grietas en los ladrillos o bloques, en lugar de presentarse

aquellas en las juntas. El añadir cal a los morteros facilita que cuando se producen movimientos estructurales, el mortero asuma la tensión y no la transmita, evitando las citadas grietas en los ladrillos.

- Reducción del agrietamiento: cuando el mortero con cal se agrieta lo suele hacer en forma de multitud de pequeñas grietas; posteriormente la acción del agua disuelve la cal, que precipita, al evaporarse aquella, en forma de carbonato cálcico al reaccionar con el dióxido de carbono, lo que provoca el sellado de las microgrietas.
- Cualidades desinfectantes: la cal, como gran desinfectante natural, mejora esta característica en el mortero.
- Cuestiones estéticas: la estética depende claramente de las modas, pero lo que si es cierto, generalmente, es que los morteros con cal suelen ser más claros y, por tanto, presentan una mayor luminosidad y una tonalidad más deseada. También se considera que los morteros con cal presentan una mayor untuosidad muy apreciada por los albañiles y decoradores.

#### 4.1.1.2 Proceso de fabricación

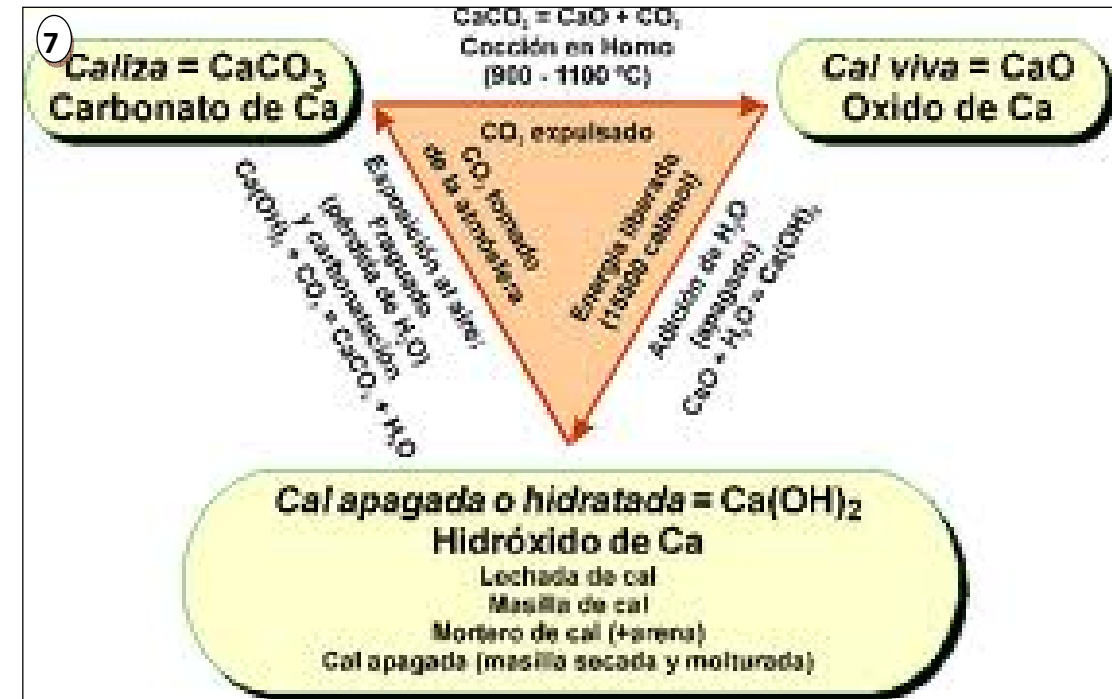
Una vez que la piedra caliza se trae desde la cantera, se somete a un proceso de trituración (en algunos casos puede venir ya triturada en cantera) y posteriormente se introduce en el horno, clave del proceso de fabricación. Allí tiene lugar la calcinación o disociación del carbonato, mediante una reacción endotérmica que requiere unas 425 kcal por kg de caliza. Durante la calcinación se obtiene óxido de calcio (cal viva), con una pérdida del 44% del peso de la caliza debido al desprendimiento de dióxido de carbono. La reacción básica de calcinación es:



El horno donde tiene lugar la calcinación ha de llegar a una temperatura teórica de disociación de las calizas de 900°C, éste puede ser de tipo vertical u horizontal, aunque el primero es el más común en la actualidad, básicamente por cuestiones de rendimiento económico y productividad. En él, la piedra caliza, con unos tamaños ya seleccionados y que oscilan aproximadamente entre 20 y 80mm, asciende por un sistema de canchales y se deposita en la parte alta del mismo donde comienza el proceso, primero con una pre calcinación y posteriormente con la calcinación propiamente dicha, alcanzándose temperaturas que superan los 1.000°C. Bajo estas condiciones, los fragmentos de caliza experimentan un aumento de volumen de poros para después reducirse cuando se produce la sinterización.

Una vez finalizado el proceso, el material, rebajada su temperatura con aire frío, se descarga por la parte inferior, después de haber permanecido en el horno unas 24 horas. Este producto así fabricado se suele denominar terrones de cal, que o bien se almacenan y se suministran en grano, o bien se muelen hasta tamaños muy finos, y se comercializan como cal micronizada.

Por último, si el producto es requerido, se puede suministrar como cal hidratada o apagada. En este caso, la cal viva salida del horno se lleva a hidratadores, donde se mezcla con la cantidad de agua adecuada para producir el apagado o hidratación de la cal. Esto da lugar a una reacción exotérmica en la que se desprenden unas 275kcal por kg de cal viva. El producto se ofrece bajo la forma bien de un polvo seco muy fino (si la proporción de agua con la que se mezcla la cal viva se hace en cantidades similares de ambas sustancias), bien de una pasta en caliente muy apreciada para lechadas de calidad.



#### 4.1.1.3 Definiciones y tipos de cal.

Según la norma "UNE-EN 459-1:2002. Cales para la construcción" las definiciones, especificaciones y criterios de conformidad es la aplicable a las cales cuando se quieren utilizar como material de construcción que es.

Los diferentes tipos de cal son los siguientes:

- Cales cálcicas: denominadas como CL, son las cales constituidas principalmente de óxido de calcio o de hidróxido de calcio, sin adición de materiales puzolánicos o hidráulicos.
- Cales dolomíticas: denominadas como DL, son las cales constituidas principalmente por óxidos o hidróxidos de cal y de magnesio, sin adición de materiales puzolánicos o hidráulicos. Pueden ser también semihidratadas (S1) o totalmente hidratadas (S2).
- Cales hidráulicas: denominadas como HL, son las cales principalmente constituidas por hidróxido de calcio, silicatos de calcio y aluminatos de calcio producidos por la

mezcla de constituyentes adecuados. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer con el agua. El dióxido de carbono presente en el aire contribuye igualmente al proceso de endurecimiento.

- Cales hidráulicas naturales: denominadas como NHL, son las cales producidas por la calcinación de calizas más o menos arcillosas o silíceas con reducción a polvo mediante apagado con o sin molienda; todas tiene la propiedad de fraguar y endurecer con el agua y, además, el dióxido de carbono presente en el aire contribuye igualmente al proceso de endurecimiento. Dentro de estas están las cales hidráulicas naturales con adición de materiales (se denominan con el NHL anterior más el añadido Z), que són aquellas que tiene materiales hidráulicos o puzolánicos adecuados hasta un 20% en masa.

Estos tipos se encuadran dentro de los grandes grupos de cales que existen: las aéreas y las hidráulicas. Las primeras, las cálcicas y dolomíticas, són las cales constituidas principalmente por óxido de hidróxido de calcio que endurecen lentamente al

DESIGNACIÓN	NOTACIÓN	CaO+MgO % en masa	MgO % en masa	CO <sub>2</sub> % en masa	SO <sub>3</sub> % en masa	Cal libre % en masa
Cal Cálctica 90	CL 90	≥90	≤5 (2)	≤4	≤2	-
Cal Cálctica 80	CL 80	≥80	≤5 (2)	≤7	≤2	-
Cal Cálctica 70	CL 70	≥70	≤5	≤12	≤2	-
Cales dolomíticas 85	DL 85	≥85	≥30	≤7	≤2	-
Cales Dolomíticas 80	DL 80	≥80	≥5	≤7	≤2	-
Cal hidráulica 2	HL 2	-	-	-	≤3 (1)	≥8
Cal Hidráulica 3,5	HL 3,5	-	-	-	≤3 (1)	≥6
Cal hidráulica 5	HL 5	-	-	-	≤3 (1)	≥3
Cal Hidráulica natural 2	NHL 2	-	-	-	≤3 (1)	≥15
Cal hidráulica natural 3,5	NHL 3,5	-	-	-	≤3 (1)	≥9
Cal hidráulica natural 5	NHL 5	-	-	-	≤3 (1)	≥3

(1) Un contenido de SO<sub>3</sub> superior al 3% e inferior al 7% es admisible, a condición de que la estabilidad sea confirmada después de 28 días de conservación en agua, según el ensayo dado en la Norma Europea EN196-2.

(2) Un contenido de MgO hasta el 7% es admisible a condición de que la estabilidad sea confirmada según el ensayo dado de la Norma Europea EN459-2:2001.



aire bajo el efecto del dióxido de carbono presente en el mismo; en general, no endurecen bajo el agua

pues no poseen propiedades hidráulicas. Las segundas, las hidráulicas, ya están definidas en los propios tipos. Ambos grupos de cales, tal como se observa en la tabla deben clasificarse en función de su contenido en (CaO+MgO) para las aéreas y de su resistencia a la compresión para las hidráulicas. Además, y esto es muy importante

posterior suministro, las cales aéreas se dividen en cales vivas y cales hidratadas (también llamadas corrientemente cales apagadas). Las cales vivas denominadas con la letra Q, son las cales aéreas constituidas principalmente por óxido de calcio y de magnesio, producidos por la calcinación de caliza y/o dolomía; tienen una reacción exotérmica en contacto con el agua y se presentan en distintas granulometrías que van desde terrones a material finamente molido. Las hidratadas (denominadas con la letra S), por su parte, son el resultado del apagado controlado de las cales vivas y se producen en forma de polvo seco, de pasta o de lechada.

#### 4.1.2 Áridos

Los áridos utilizados en el proyecto son de machaqueo, procedentes de la planta de áridos EPSA situada a Banyoles, debido a la proximidad con la teórica obra.

Para la realización del hormigón obtuvimos diferentes muestras de la planta para su posterior análisis granulométrico. Obteniendo así un abanico de posibles muestras para el hormigón y decantándonos finalmente por dos gravas y una arena determinadas.

Estas gravas y arena son las siguientes:

- Grava grande -11/22 de origen calcáreo
- Grava mediana – 6 / 22 de origen calcáreo
- Arena – 0/5 de origen calcáreo.

#### 4.1.2.1 Propiedades geométricas

Se incluyen aquí los aspectos relativos a los estudios granulométricos, es decir, los tamaños de grano y porcentajes relativos presentes en el árido, así como la forma de las partículas (angulosidad, esfericidad o redondez).

Los áridos, tanto naturales como de machaqueo, se caracterizan, en una primera fase, por el tamaño de sus partículas. Para ello, se lleva a cabo un proceso de tamizado de la muestra, previamente reducida su cantidad tal como se hizo constar en el apartado anterior, y se pesan las fracciones retenidas en cada tamiz. El tamaño mínimo de los tamices suele ser de 0,063mm, por lo que la proporción de fracción inferior se determina por otros métodos, como la sedimentación.

El peso retenido en cada tamiza se divide por el peso total de la muestra, obteniéndose así el peso retenido en tanto por ciento para cada fracción. Posteriormente, y con el fin de construir la

curva granulométrica, se calcula el peso retenido acumulado, sumando a cada fracción el peso total de las fracciones anteriores (sería equivalente al peso retenido de esa fracción si no hubiera tamices con aberturas mayores a dicha fracción).

Con los resultados obtenidos se construye la curva granulométrica, normalmente en papel semilogarítmico, y su estudio permite conocer si el árido está bien clasificado, la fracción o fracciones predominantes y otros aspectos de gran importancia en función del uso que se le vaya a dar al material.





La granulometría en los áridos no es una característica uniforme, ya que depende de su procedencia. En el caso de los áridos granulares, extraídos en las graveras, su distribución de tamaños depende de los procesos previos de erosión, transporte y sedimentación de los materiales, mientras que para los áridos de machaqueo su granulometría vendrá condicionada por los procesos de trituración llevados a cabo, siendo en este punto el factor primordial la suma de los porcentajes acumulados retenidos en los tamices y dividida por cien recibe el nombre de módulo granulométrico. Da una aproximación del tamaño medio del árido aunque pueden existir infinitas granulometrías con el mismo módulo granulométrico. Sin embargo, su importancia es notable, ya que todas las mezclas que posean similar modulo necesitarán la misma cantidad de agua para producir hormigones de iguales resistencias (a igual cantidad de conglomerante).

maquinaria utilizada en la molienda. Por ello, es imprescindible establecer límites muy precisos que afecten tanto a los tamaños mínimo y máximo a utilizar así como la proporción de cada una de las fracciones.

Los áridos se designan por su tamaño mínimo  $d$  y su tamaño máximo  $D$  en mm, de acuerdo con la siguiente expresión:  $d/D$ . Para ello, se denomina tamaño máximo  $D$  de un árido la mínima abertura de tamiz por el que pasa más de un 90% en peso, cuando además pasa el total por el tamiz de abertura doble. Y se denomina tamaño mínimo  $d$  de un árido, la máxima abertura de tamiz por el que pase menos del 10% en peso. Para conocer el contenido en finos fruto del machaqueo o de su presencia en las arenas de los áridos granulares, se suele utilizar el ensayo del equivalente de arena, con valores delimitados en la EHE. Este ensayo es muy simple y consiste, de forma sintética, en introducir una muestra de árido en una probeta y agitarla para después dejarla decantar un tiempo determinado y medir la cantidad de finos presentes

por encima de la arena ya sedimentada. Para finalizar con el tema de la granulometría, comentar que se define como “ granulometría óptima” aquella en la que, para una misma relación agua/conglomerante, se obtiene un consumo mínimo de cemento. Las granulometrías óptimas, se obtienen con el mínimo de huecos, es decir, la máxima compactación (además, la máxima compactación, según Feret, genera la máxima resistencia). Esto ha generado desde siempre una compleja diatriba sobre que granulometría es mejor, si una de carácter continuo, es decir, aquella en la que existen valores de todos los tamaños u otra discontinua, que es, lógicamente, aquella en la que faltan algunas fracciones.

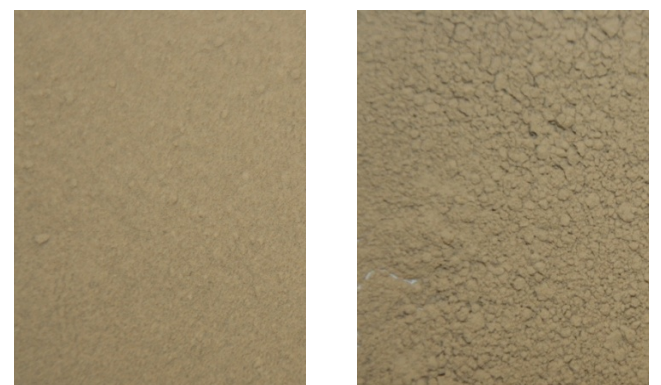
Anteriormente se ha descrito el método para nombrar a las granulometrías, siendo éste factor muy importante pues todavía existe un gran número de terminologías al uso (almendra, garbancillo, gravilla, morro y otras muchas más) que dependen, exclusivamente, de la zona geográfica, produciéndose un sinfín de confusiones.

#### 4.1.2.2 Propiedades físicas

Dentro de este gran grupo se incluyen todas aquellas propiedades físicas que pueden afectar al comportamiento del árido, básicamente la densidad, la absorción de agua, la porosidad, la humedad o la dureza.

- Densidad.

La densidad es importante sobre todo cuando se va a dosificar el hormigón en volumen o cuando se quiere fabricar hormigones ligeros o pesados. Otro aspecto interesante es el tema de los diferentes tipos de densidades, en función de la comunicación entre los poros existentes, el grado de humedad, etc., surgiendo así los conceptos de densidad aparente y densidad relativa. La primera se define como el cociente entre la masa de la muestra de árido, secada en estufa, y el volumen aparente de la



misma, siendo éste el que ocupa la parte sólida más el volumen de poros (accesibles y no accesibles al agua). A su vez la densidad relativa se establece como el cociente entre el mismo numerador anterior y el volumen de la parte sólida más los poros inaccesibles. Puesto que la densidad es la que caracteriza a los áridos ligeros, normales y pesados, las definiciones de éstos en la normativa vigente son los siguientes:

- **Árido ligero:** árido de origen mineral que, después de secado en estufa, tiene una densidad  $\leq 2.000 \text{ kg/m}^3$  o una densidad aparente  $\leq 1.200 \text{ kg/m}^3$  (según UNE-EN 206-1:2000) o árido de origen mineral con una densidad de partículas no superior a  $2.000 \text{ kg/m}^3$  o con una densidad aparente no superior a  $1.200 \text{ kg/m}^3$  (según UNE-EN 13055-1:2002).
- **Árido normal:** árido que después de secado en una estufa tiene una densidad  $> 2.000 \text{ kg/m}^3$  y  $< 3.000 \text{ kg/m}^3$  (según UNE-EN 206-1:2000).
- **Árido pesado:** árido que después de secado en estufa tiene una densidad mayor o igual a  $3.000 \text{ kg/m}^3$  (según UNE-EN 206-1:2000).
- **Absorción de agua**

La absorción de agua condiciona la docilidad del hormigón, pues cuanta mayor cantidad de agua absorba el árido, menor cantidad quedará disponible en el amasado. Existe una medida de dicha absorción, que es el denominado coeficiente de absorción y que se define como el cociente entre la masa del árido después de un periodo de inmersión en agua y la masa seca del árido. Su importancia en el hormigón es tal que es una de las propiedades que regula la EHE. La norma UNE-EN correspondiente es la 1097-6:2001.

- **Porosidad**

La porosidad, que se define como la relación entre el volumen de poros y el volumen total de la roca, expresado como porcentaje, tiene una gran importancia en el estudio de los procesos de degradación de las características físicas de la roca. La porosidad está íntimamente ligada con la circulación de fluidos dentro del material, por lo que condiciona toda una serie de propiedades del mismo, como son la absorción de agua, succión capilar, contenido en humedad natural, resistencia a los ciclos-deshielo, etc., todo ello de gran trascendencia en aspectos como la durabilidad del hormigón.

- **Humedad**

La humedad del árido, y más en concreto de las arenas, determina en gran medida el entumecimiento, que es el incremento de volumen que sufren cuando se humedecen, al rodearse los granos de una película de agua. Por ello es imprescindible su medida, especialmente si se hacen dosificaciones en volumen, pues debe restarse de la cantidad de agua que se añade para el amasado del hormigón. El citado incremento de volumen es máximo para los valores de humedad entre el 5 y el 10%.

- **Dureza**

En cuanto a la dureza, resulta trascendente en aquellas aplicaciones en las que el hormigón puede estar sometido a impactos. Existen numerosos índices y coeficientes que miden este comportamiento (coeficiente de impacto, de fragmentación, etc.). Probablemente, el más conocido y utilizado sea el coeficiente de desgaste de los ángeles.

La utilidad del ensayo de los ángeles no se ciñe exclusivamente a la caracterización mecánica del árido, sino que ofrece información de la forma y homogeneidad de las partículas que constituyen la fracción estudiada.

#### 4.1.2.3 Propiedades mecánicas

La resistencia a compresión es la propiedad mecánica más importante en el hormigón y, en el árido que lo constituye. Puesto que el hormigón no puede tener mayor resistencia a compresión que los áridos que lo constituyen, es imprescindible analizar el valor de la resistencia en el árido, lo cual no siempre es fácil por las propias características del material, acudiéndose normalmente a medidas indirectas pero válidas: confección de hormigones patrón y estudio comparativo con ellos. Los áridos que se utilizan en el hormigón, principalmente calizas y materiales silíceos suelen tener resistencias a compresión superiores a  $100 \text{ N/mm}^2$ , por lo que no presentan ningún problema para su uso, salvo que se esté fabricando hormigones de altas resistencias, en cuyo caso hay que extremar el cuidado en la selección de los materiales.

#### 4.1.3 Chamota

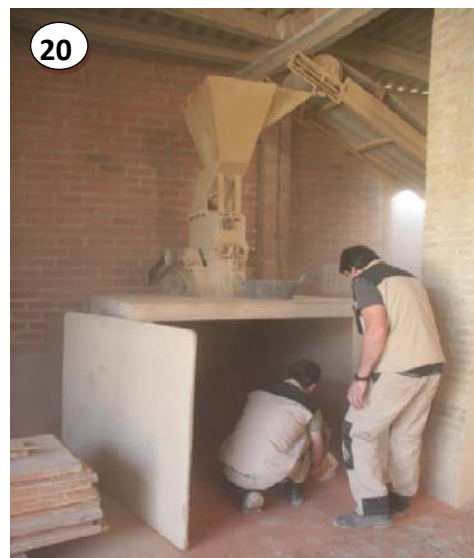
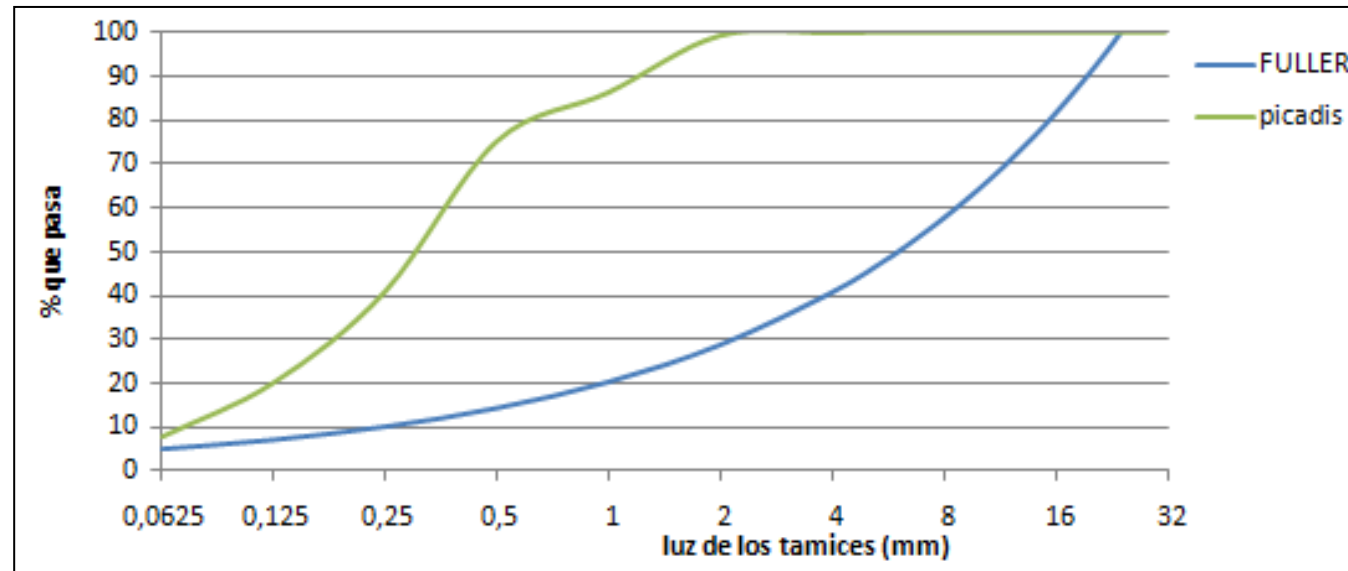
La chamota, elemento imprescindible en nuestro proyecto, dado que su función va a ser actuar como elemento que va a aportarle hidraulicidad y otras propiedades, como resistencia mecánica a nuestro hormigón; esta proviene de la empresa CERÀMIQUES SALT DEL MATXO, SCP situada en Porqueres ( Girona).

##### 4.1.3.1 Definición

Por cocchiopesto o chamota se entiende una puzolana artificial hecha de arcilla finamente triturada para obtener el deseado tamaño de las partículas. El nombre se refiere al material obtenido por trituración de barro tejas o azulejos. Hay también una variedad con menos calidad, con un agregado de ladrillo machacado, que a veces se llama mattonpesto.

El cocchiopesto, con sustitución en parte o total de la arena normal, se utiliza para confeccionar morteros a base de cal ( hidróxido de calcio ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ) que, en ausencia de este agregado reactivo,





no podría endurecer si no está en contacto con el aire, a través de este proceso químico conocido como carbonatación : la adición de este agregado se realizó a continuación con funciones hidráulicas, que es conseguir un mortero de cal con propiedades hidráulicas , aunque el grado de los recursos hídricos disponibles es menor que los derivados de la utilización de puzolana.

La chamota es un material cerámico, es decir, cerámica cocida, molida y reducida a granos según distintas clasificaciones, para su elaboración se emplean a modo industrial arcillas refractarias, aunque como artesanos podemos utilizar simplemente las piezas defectuosas. La chamota tiene la característica de no contraerse al mezclarse con la pasta, ya que ha eliminado en la cocción toda el agua de su composición.

Su función es de desengrasante, para dar textura y expresión a la pasta y quitar un exceso de plasticidad. Su uso es conocido desde la antigüedad y en todo tipo de culturas.

#### 4.1.3.2 Composición

Esta materia prima podríamos dar como composición aproximada:

- 40% alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



- 30% sílice (SiO<sub>2</sub>),
- 4% óxido de hierro (III) (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) como máximo,
- 2% como máximo óxido de calcio (CaO)

#### 4.1.3.3 Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de la chamota, se basa en la trituración de piezas cerámicas que no han sido bien cocidas y que no han acabado en obra por alguna deficiencia; normalmente en el proceso de cocción. Este proceso de fabricación se lleva a cabo en la empresa CERÀMIQUES SALT DEL MATXO, SCP.

#### 4.2 Primeras aproximaciones

Inicialmente, para desarrollar un hormigón de cal y chamota, creemos conveniente analizar la pasta sin la influencia de los áridos, para determinar el agua necesaria para una consistencia normal según ensayo “testmayer”, probando con distintas dosificaciones de cal/chamota.

#### 4.2.1 Dosificación pasta cal/chamota

Para la aplicación de los siguientes ensayos consideramos oportuno realizar diferentes dosificaciones de pasta cal-chamota, estas iban desde la dosificación 1-0,8 hasta la 1-1,8. Con las diferentes dosificaciones introducimos las pastas en bolsas herméticamente cerradas para que endurecieran sin estar en contacto con el aire y por tanto que estas nos dieran una primera aproximación de que dosificaciones nos podían dar unas resistencias hidráulicas mayores.

#### 4.2.2 Consistencia normal de la pasta

La norma UNE-EN 196-3 describe los métodos de ensayo para determinar la consistencia normal, el tiempo de fraguado y la estabilidad de volumen de los cementos.

La pasta de cemento de consistencia normal tiene una resistencia especificada a la penetración de una sonda normalizada. El agua requerida para la preparación de dicha pasta se determina por medio

de sucesivos ensayos de penetración en pastas con diferentes contenidos de agua.

El tiempo de fraguado se determina observando la penetración de una aguja en una pasta de cemento de consistencia normal, hasta que alcanza un valor especificado.

La estabilidad de volumen se determina observando la expansión volumétrica de la pasta de cemento de consistencia normal, indicada por el desplazamiento relativo de dos agujas.

El laboratorio en el que se preparan y ensayan las probetas se deben mantener a una temperatura de (20±2) °C así como también el cemento el agua y los equipos para su elaboración y ensayo, y una humedad relativa mínima del 50%.

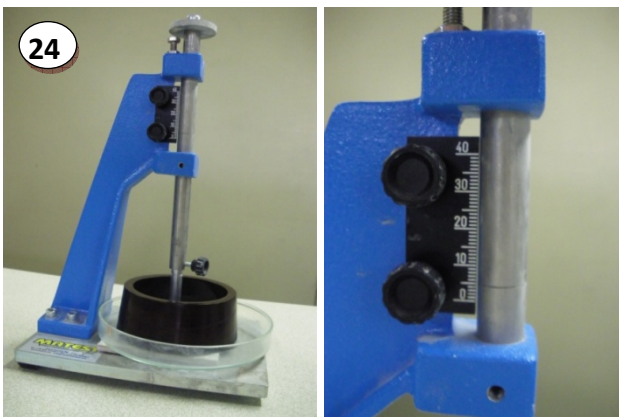
#### 4.2.2.1 Equipo

Para llevar a cabo el amasado de la pasta utilizaremos una maquina amasadora de la marca Matest, normalizada según UNE EN-196-1 de dos velocidades, siendo la velocidad lenta de rotación de 140 +/- 5rpm, la velocidad rápida de 285 +/- 10 rpm y la velocidad de traslación de 62 +/- 5rpm para la velocidad lenta y de 125 +/- 10 rpm para la velocidad rápida.

Tanto la medida de agua como la de mortero se pesan con báscula de sensibilidad 0,1g.

Se utiliza el aparato de Vicat manual, con una sonda, esta debe ser de un metal no corrosible y tener la forma de un cilindro recto, con una longitud efectiva de al menos 45 mm y un diámetro (10,00±0,05) mm. La masa total de las partes móviles debe ser de (300±1) gr. Su movimiento debe ser exactamente vertical y sin rozamiento apreciable, y sus ejes deben coincidir con el de la sonda.

El molde de Vicat destinado a contener la pasta objeto del ensayo, debe ser de caucho duro, plástico o latón. Debe ser cilíndrico o preferiblemente de



forma troncocónica, con una altura de  $(40,00 \pm 0,2)$  mm, y debe tener un diámetro interno de  $(75 \pm 10)$  mm. Debe tener una rigidez adecuada y debe contar con una placa base mayor que el molde y con un espesor mínimo de 2,5 mm, construido en material impermeable resistente al ataque de la pasta de cemento, por ejemplo de vidrio plano.

#### 4.2.2.2 Procedimiento

Se pesan en una balanza 500 gr de cal con una precisión de  $\pm 1$  gr y una cantidad de agua, por ejemplo 125 gr. Cuando el agua se mide en volumen utilizando la bureta o la probeta graduada se debe medir con precisión  $\pm 1$  mm. Se mezcla mecánicamente cada lote de pasta de cemento utilizando la amasadora. La duración de las diferentes etapas de mezclado se refiere al tiempo en el cual se conecta/desconecta la amasadora y se debe mantener durante  $\pm 2$  seg.

Con la amasadora en posición de funcionamiento:

- Se coloca el agua y el cemento en el cazo teniendo cuidado de no perder agua o cemento; se completa la adición en los 10 s posteriores.
- Inmediatamente se enciende la amasadora a velocidad lenta mientras que empieza el tiempo de las etapas de amasado.
- Tras 90 s se detiene la amasadora durante 30 s, tiempo durante el cual se elimina con rascador de plástico o caucho adecuado toda la masa adherida a las paredes y al fondo del cazo y se coloca en el medio del mismo.
- Se pone en marcha nuevamente la amasadora a velocidad lenta durante 90 segundos. El tiempo total de amasado debe ser de 3 minutos.

Se transfiere la pasta inmediatamente al molde ligeramente engrasado, colocado previamente sobre una placa base ligeramente engrasada, y se

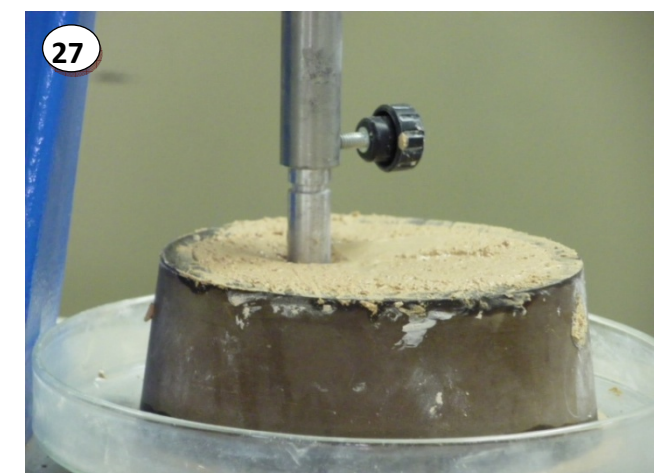
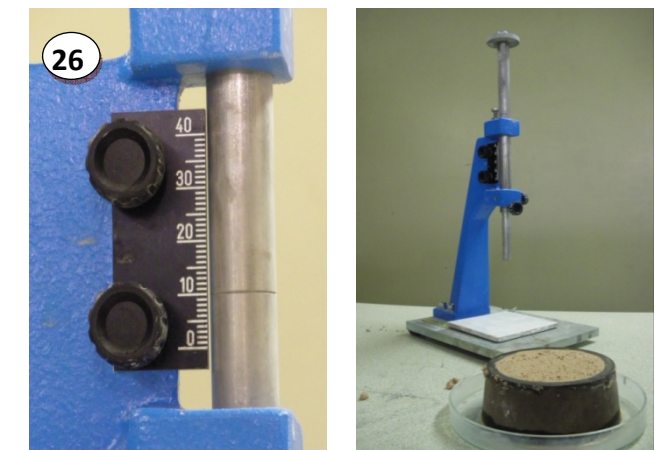
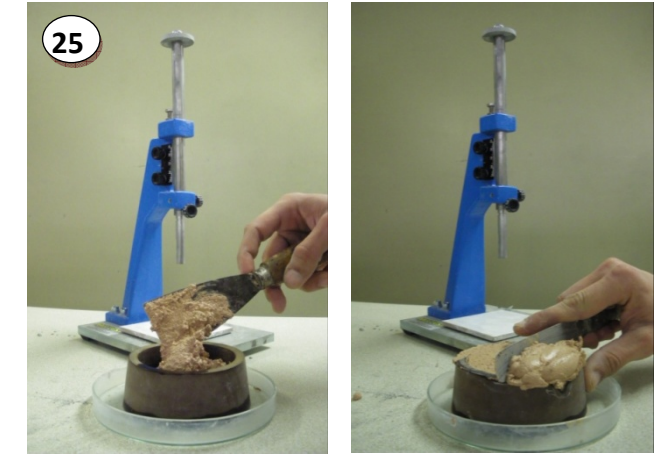
llena hasta rebosar sin compactaciones ni vibraciones excesivas. Se eliminan los huecos de la pasta mediante una serie de ligeros golpecitos con la palma de la mano sobre el molde. Se quita el exceso de pasta con un movimiento de serrado suave con un utensilio de borde recto, de manera que la pasta llene completamente el molde y tenga una superficie superior lisa.

#### 4.2.2.3 Determinación de la consistencia normal

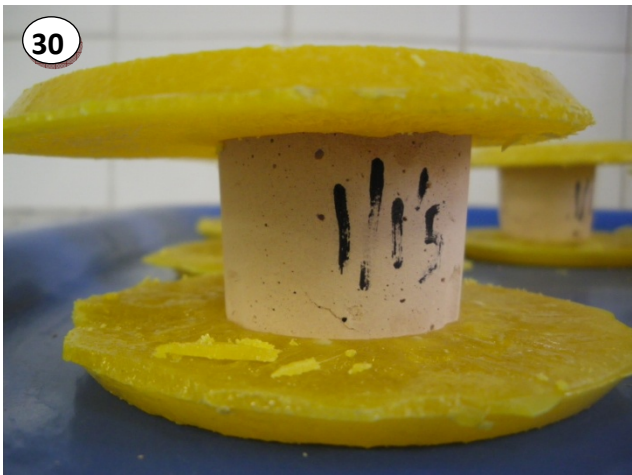
Se ajusta el aparato de Vicat manual provisto de la sonda, montada antes del ensayo, bajando la sonda hasta que esté en contacto con la placa base que vaya a utilizarse y ajustando la puesta a cero en la escala. Se levanta la sonda hasta la posición de espera. Inmediatamente después de enrasar la pasta, se coloca el molde y la placa base en el aparato de Vicat, situándolo centrados debajo de la sonda. Se baja la sonda suavemente hasta que entre en contacto con la pasta. Se espera entre 1 y 2 segundos en esa posición, con el fin de evitar una velocidad inicial o aceleración forzada de las partes móviles. Se sueltan rápidamente las partes móviles y la sonda debe penetrar, entonces, verticalmente en el centro de la pasta. La liberación de la sonda se debe realizar 4  $\text{min} \pm 10$  segundos después del tiempo de referencia cero. Se lee en la escala al menos 5 segundos tras el fin de la penetración o 30 segundos después de la liberación de la sonda, lo que ocurra primero.

Se anota la lectura de la escala, que indica la distancia entre la cara inferior de la sonda y la placa base, junto con el contenido de agua de la pasta expresada en % de la masa de cemento. Se limpia la sonda inmediatamente después de cada penetración.

Se repite el ensayo con pasta con diferentes contenidos de agua, hasta encontrar una que produzca una distancia de  $(6 \pm 2)$  mm entre la sonda y la placa base. Se anota el contenido de agua en







esta pasta, con una aproximación del 0,5%, como el agua para la obtención de la consistencia normal.

#### 4.2.3 Tipos de probetas a ensayar

Para determinar las características físicas y mecánicas de las diferentes dosificaciones de pasta, tanto en estado fresco como en estado endurecido, hemos decidido realizar distintos métodos de endurecimiento.

Disponemos de las dosificaciones anteriormente mencionadas de las cuales realizamos dos series de 11 probetas cilíndricas de 38mm de diámetro cada una, con las que determinaremos su resistencia a compresión, porosidad, densidad relativa y aparente, estando una serie en ambiente de laboratorio y la otra estando en cámara de CO<sub>2</sub> o alternando los ambientes mencionados.

Respecto al ensayo destructivo de resistencia a compresión realizado con las probetas cilíndricas, la dosificación que dio una resistencia mayor fue la 1/1,7 (cal/chamota); estas iban aumentando de resistencia hasta llegar a esta dosificación donde a partir de este punto la dosificación siguiente (1/1,8) ya daba un resultado inferior.

El resultado de este ensayo nos dio a entender, que a partir de estos, teníamos que seguir elaborando nuestra dosificación alrededor del parámetro 1/1,7 (cal/chamota).

#### 4.2.3.1 Resistencia a compresión

Para llevar a cabo este ensayo se han seguido las especificaciones de la norma UNE-EN 1015-11.

#### Dispositivo de compresión

Prensa de la casa WYKEHAM FARRANCE con células de carga máxima de 5T y 10T, provista de un utillaje específico para la aplicación de una carga puntual en una probeta apoyada (tal y como describe la norma [18]) y conectada a un display digital que registra la carga máxima. Se programa la velocidad de carga

entre 10 N/s y 50 N/s de tal manera que la rotura de la probeta se produce entre 30 y 90 segundos.

#### Procedimiento a compresión

Se coloca la probeta perfectamente centrada en la base. A continuación se baja el pistón manualmente hasta que toca la probeta, pero sin aplicar carga, y se tara a cero el display digital.

Se inicia el ensayo y cuando la probeta supera su límite elástico (estará plastificando) el display recoge la carga máxima y se anota.

#### 4.2.3.2 Densidades aparente y relativa del la pasta endurecida. Índice de porosidad.

Se determina la densidad aparente de la pasta endurecida ( $D_a$ ), así como la densidad relativa ( $D_r$ ) y el índice de porosidad accesible del material en %. La  $D_r$  se determina descontando el volumen de la red porosa del material, lo que permitirá a su vez determinar el % de poros.

Se ha variado o complementado el método operatorio de la norma UNE-EN 1015-10, ya que esta norma solo nos permite determinar la  $D_a$ . En este caso también se ha tomado como referencia la UNE de piedra natural.

Dispositivos: Horno de secado; campana de vacío con sistema de llenado de agua desmineralizada y conectada a un vacuometro digital con sensibilidad de 0,1 mbar; bomba de vacío modelo RZ 2.5 de VACUUMBRAND provista de captador de humedad de nitrógeno líquido GKF 100i; balanza con sensibilidad de 0,01 gr y pesa hidrostática.

Procedimiento operatorio: de las tres series mencionadas, fraguado hidráulico, carbonatación acelerada y las de ambiente del laboratorio, como marca la UNE-EN 1015-10, se secan en estufa a  $80 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta la que la variación de masa resulte inferior al 0,1%.



COMPOSICIÓN DE PROBETAS CÚBICAS 70X70x70mm						
Dosificación	Chamota gr	Arena (0-5) gr	Grava (6-12) gr	Grava (11-22) gr	Cal gr	Agua/cal
1/1,3	180	45	150	125	138,5	1,13
1/1,4	195	30	150	125	139,3	1,14
1/1,5	210	15	150	125	140	1,14
1/1,6	225	25	125	125	140,6	1,15
1/1,7	240	60	75	125	141,2	1,16
1/1,8	250	50	75	125	138,9	1,19

#### 4.2.3.3 Resistencia a la carbonatación

Se ha llevado a cabo un seguimiento de la velocidad de carbonatación tomando como referencia la norma de estructuras de hormigón UNE-EN 13295.

Se ha controlado la carbonatación de las probetas a los 23 y 17 días de fabricación (inmediatamente después del ensayo a compresión. A los 13 días de ambiente + 10 días en la cámara de CO<sub>2</sub> y a 7 días de ambiente + 10 días en la cámara de CO<sub>2</sub>.

También se ha controlado la resistencia a la carbonatación de las probetas mientras estaban siendo sometidas a carbonatación acelerada. En este caso, se hizo un control a las probetas destinadas para tal fin (probetas de sacrificio).

Dispositivos: Se utiliza una disolución de fenolftaleína, que contiene 1g del indicador fenolftaleína en una disolución de 70 ml de etanol y 30 ml de agua desmineralizada.

Para llevar a cabo controles periódicos, se utiliza un martillo y un cincel para ir cortando fragmentos de las probetas, y un pie de rey digital de la casa VOGEL con sensibilidad de 0,01 mm.

Procedimiento operatorio: Los restos de la rotura a compresión se rocían con la disolución de fenolftaleína y, al instante, vira a color magenta la zona no carbonatada de la probeta, compuesta fundamentalmente por hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>). La fenolftaleína vira a color magenta cuando entra en contacto con sustancias básicas (pH superior a 7), y el hidróxido de calcio posee un pH de 12. Como el carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>) es insoluble, la fenolftaleína no puede actuar, quedando incolora la zona de este compuesto.

Se mide la profundidad de carbonatación del diámetro de la probeta con el pie de rey digital y se recogen gráficamente los datos mediante cámara fotográfica digital para confeccionar el informe correspondiente de cada dosificación.

De esta forma se puede apreciar la evolución de la carbonatación de cada dosificación, así como el sustancial incremento en la velocidad de carbonatación de las probetas sometidas a envejecimiento acelerado.

#### 4.2.4 Realización de probetas cúbicas

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos anteriores se decide realizar probetas cúbicas de 70x70x70mm, realizadas con la totalidad de materiales, es decir con áridos, cal y chamota.

Se realizaron 12 probetas cúbicas, de las distintas dosificaciones a estudiar, realizando 2 series de 6 probetas cada una como muestra la tabla.

Equipo de amasado

Se utilizó el mismo dispositivo de mezclado que en la confección de las pastas, descrito en el apartado 4.2.2.1.

Moldes

Se han utilizado moldes cúbicos de 70x70x70mm de hierro colado, desmontables mediante tornillería, aplicándole una solución de aceite-gasolina en su interior para facilitar el desmolde de la probeta.

Procedimiento

Se pesan en una balanza de precisión  $\pm 0,1$  gr la cantidad de cal que especifique la dosificación en cuestión, se introduce en la amasadora esta cantidad de cal junto con el agua necesaria para una consistencia normal según el apartado 4.2.2.3, a continuación y después de unos 90 segundos a velocidad lenta de la amasadora se introduce la chamota, dejando amasar la pasta 90 segundos más, y finalmente se introducen las 2 gravas y la arena en este orden.



Se pesan las muestras desecadas y se anotan las lecturas. También se miden con pie de rey digital todas las muestras para determinar el volumen aparente (Va).

A continuación se introducen las muestras debidamente referenciadas en la campana de vacío y se activa la bomba de vacío. Esta bomba permite crear una depresión atmosférica de hasta 8 mbar en la campana en pocos minutos.

Una vez conseguido el vacío se activa el sistema de llenado de agua de manera que inunden las muestras muy lentamente. Al verificar que el nivel del agua rebasa unos 15mm la altura de las muestras se deja el equipo en funcionamiento durante 5 horas. Transcurrido este tiempo procedemos a las pesadas.

Lo que se consigue mediante este sistema es eliminar el aire que hay en la red porosa accesible, para que luego se puedan llenar completamente de agua, lo que posteriormente servirá para determinar la DA, la DR y el índice de porosidad accesible de cada producto.

A continuación se pesan todas las muestras con la báscula y la báscula hidrostática anotando el peso saturado así como el peso hidrostático. Conociendo estos pesos y el VA (medición previa al ensayo) se procede a elaborar el informe correspondiente.





Una vez se ha finalizado este proceso se continua con el llenado de los moldes. Antes de empezar con el llenado aplicamos el desencofrante antes mencionado en el interior de los moldes. Para realizar el llenado hemos utilizado una espátula para introducir el hormigón y una varilla a modo de vibrador para evitar aire ocluido en el interior de este, es decir para que no se produzcan coqueas.

A continuación se etiquetaron las diferentes probetas con su dosificación correspondiente para su correcta identificación.

Pasadas 24 horas del llenado de los moldes se procedió al desmolde de las probetas, para poder realizar un seguimiento de su peso en los días posteriores.

Serie 1:

- Las seis probetas de la serie 1 han estado en ambiente de laboratorio (25-29°C / 50-60% de humedad relativa en el ambiente) desde el 04/05/2010 hasta 31/08/2010; es decir un equivalente a 117 días.
- Estas probetas han sido sumergidas periódicamente a lo largo de su proceso de endurecimiento, para conseguir una reacción puzolánica. Para esta reacción es necesario la presencia de H<sub>2</sub>O, para que el hidróxido cálcico reaccione con los aluminosilicatos presentes en la chamota.
- Estas probetas han tenido un control de peso periódico, analizando así la pérdida de agua que estas sufrían.
- La rotura de las probetas se ha realizado con el mismo dispositivo de compresión utilizado y descrito en el apartado **4.2.3.1**.
- Seguidamente a su rotura se aplica una solución de fenolftaleína a las probetas, para poder evaluar hasta que punto se han carbonatado. La solución de fenolftaleína esta descrita en el apartado **4.2.3.3**.



Serie 2:

- Las seis probetas de la serie 2 han estado en ambiente de laboratorio (22-27°C / 45-60% de humedad relativa en el ambiente) desde el 04/05/2010 hasta 11/05/2010; es decir un equivalente a 7 días; y posteriormente han sido introducidas en la cámara de CO<sub>2</sub>, para así acelerar su carbonatación, un total de 27 días.
- Estas probetas han tenido un control de peso periódico, analizando así la pérdida de agua que estas sufren.
- La rotura de las probetas se ha realizado con el mismo dispositivo de compresión utilizado y descrito en el apartado 4.2.3.1.
- Seguidamente a su rotura se aplica una solución de fenolftaleína a las probetas, para poder evaluar hasta que punto se han carbonatado. La solución de fenolftaleína esta descrita en el apartado 4.2.3.3.





#### 4.2.5 Realización primeras probetas cilíndricas

Durante estas primeras aproximaciones hemos creído conveniente realizar amasadas mayores para poder determinar su trabajabilidad, docilidad y consistencia, realizando probetas cilíndricas de  $\varnothing 150\text{mm}$  y 300mm de altura; ya que podrían variar estas características debido al inferior tamaño de las probetas cúbicas.

Como en las probetas anteriores realizadas en moldes cúbicos de 70x70x70mm de hierro colado, se hicieron diferentes tipos de dosificaciones, de las cuales decidimos llevar a cabo, algunas que podíamos prever de antemano que no iban a dar los mejores resultados basándonos en el camino que nos habían marcado los ensayos de probetas de menor tamaño y de las cúbicas; y otras con dosificaciones más altas pensando en que su resistencia fuera ganando enteros según nos íbamos acercando a dosificaciones mucho más exactas.

Para llevar a cabo estas probetas cilíndricas, se utilizó un capazo de goma, con capacidad de 20 litros, una paleta catalana, mas los materiales propios para realizar el hormigón.

El amasado se hizo de manera manual, mezclando gravas, arena, cal y chamota con la paleta.

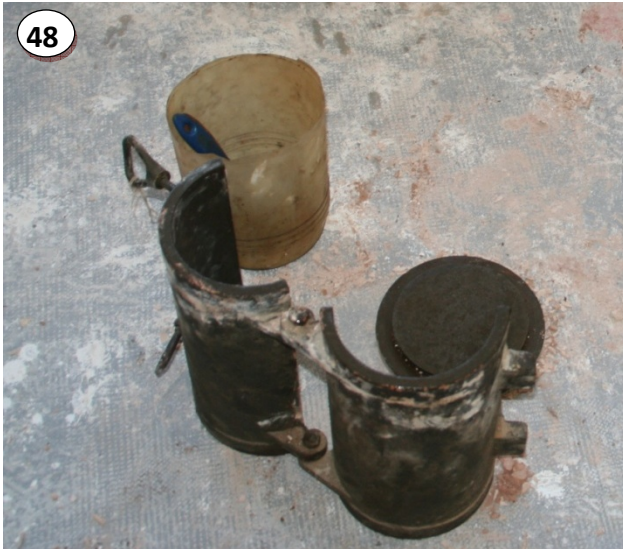
Una vez se obtiene una mezcla homogénea, sin nódulos de cal y chamota, hemos realizado el ensayo de cono de Abrams. El procedimiento se llevo a cabo tal y como nos indica la norma UNE 83-313-90, humedeciendo los elementos que estarán en contacto con el hormigón antes de realizar el ensayo con tal de no absorber el agua del compuesto, ayudándonos barra metálica para compactar este, y un metro para medir el asentamiento de este, tal y como nos indica la citada norma.

Después de realizar el cono se procede a el vertido del hormigón en los moldes (diámetro 150mm y

TABLA DE RELACIÓN DE COMPONENTES DEL HORMIGÓN DE CAL								
DOSIFICACIÓN	CAL/CHAMOTA	AGUA/CAL	RELACIÓN DE ÁRIDOS			CONO DE ABRAMS (respecto 30cm)	Nº PROB.	FECHA
			Arena (0-5)	Grava pequeña (6-12)	Grava grande (11-22)			
I	1,08 (1/0,93)	1,29 (1/0,77)	32,80%	20,00%	27,20%	baja 12,5=17,5cm	3	22/02/2010
II	1 (1/1)	1,5 (1/0,66)	26,00%	24,00%	30,00%	baja 19=11cm	1	24/02/2010
III	1 (1/1)	1,4 (1/0,71)	26,00%	24,00%	30,00%	baja 14=16cm	1	03/03/2010
IV	1 (1/1)	1,35 (1/0,74)	26,00%	24,00%	30,00%	baja 13,5=16,5cm	1	03/03/2010
V	1 (1/1)	1,35 (1/0,74)	18,00%	19,00%	38,00%	baja 13=17cm	1	17/03/2010
VI	1 (1/1)	1,36 (1/0,73)	18,00%	19,00%	38,00%	baja 13,3=16,7cm	1	17/03/2010
VIIa	0,67 (1/1,5)	1,47 (1/0,68)	15,00%	30,00%	25,00%	baja 12=18cm	1	23/03/2010
VIIb	0,67 (1/1,5)	1,41 (1/0,71)	15,00%	30,00%	25,00%	baja 8,3=21,7cm	1	23/03/2010
VIIIa	0,67 (1/1,5)	1,41 (1/0,71)	3,00%	30,00%	25,00%	baja 14,5=15,5cm	1	24/03/2010
VIIIb	0,67 (1/1,5)	1,36 (1/0,73)	3,00%	30,00%	25,00%	baja 9,9=20,1cm	1	26/03/2010
IX	0,58 (1/1,7)	1,31 (1/0,76)	5,00%	25,00%	25,00%	baja 7= 23cm	1	07/05/2010

altura 300mm de hierro colado), este llenado se produce en 3 tongadas de 1/3 aproximadamente del volumen del molde cilíndrico, después de cada tongada es necesario introducir repetidas veces en el molde una barra metálica, con diámetro especificado por la norma UNE-EN 83-301, y golpear el molde con una maza de goma con tal de hacer salir el posible aire ocluido atrapado en el interior del hormigón fresco, así, de este modo, se evitan coqueras posteriores una vez endurezca el hormigón.





### 4.3 Procedimiento de las probetas cilíndricas y ensayos utilizados

En este apartado explicaremos más detalladamente el procedimiento utilizado para la realización de las probetas cilíndricas con la dosificación elegida finalmente que se trata de una relación cal-chamota de 1/1,7 y un porcentaje de grava grande (11-22) del 25% , un 25% de grava pequeña (6-12), un 5% de arena (0-5) y un 45% de chamota.

#### 4.3.1 Equipo utilizado

El equipo utilizado para la realización de estas probetas se detalla a continuación:

- Moldes

Los moldes con los que se fabrican las probetas descritas tienen que ser estancos y no absorbentes y fabricados en acero o fundición, siendo estos los materiales de referencia. Así mismo, todas sus partes deben ser lo suficientemente robustas para impedir cualquier deformación en el montaje y uso. Definición probeta cilíndrica: cilindro de hormigón de 15cm (6 pulgadas) de diámetro, y 30cm (12 pulgadas) de altura, curado bajo unas condiciones controladas.

Los moldes deben ser de metal u otro material resistente, estancos a la lechada, de superficies interiores lisas, libres de saltaduras, hendiduras o resaltes. Las superficies interiores deberán ser perpendiculares entre sí y las opuestas, paralelas. La dimensión básica de las probetas (d) será igual o mayor a tres veces el tamaño máximo nominal del árido.

Los moldes cilíndricos tendrán diámetro interior de dimensión básica "d" y altura "2 d".

La superficie de los moldes que entran en contacto con el hormigón se untará con una delgada película de aceite mineral o cualquier otro material que prevenga la adherencia y no reaccione con los componentes del hormigón.

- Hormigonera

La hormigonera utilizada es modelo GUY NOEL B-150, eléctrica con motor monofásico de 700 w, capacidad 150 lt y con protector de corona.

La hormigonera ha sido humedecida antes de su utilización para el amasado, para así evitar la absorción de agua por parte de la hormigonera perteneciente a nuestro compuesto.

- Vibrador

Para evitar en el hormigón fresco aire ocluido en su interior, en el momento del llenado de la probeta es necesario utilizar un método de compactación en nuestro caso se ha utilizado un vibrador de la marca Matest con un motor de 550w de potencia y un voltaje de 220V con una frecuencia de 50hz, la frecuencia de giro por minuto es de 3000 r.p.m.

- Herramientas

También han sido necesario para realizar las distintas fases del proceso de elaboración de las probetas: una paleta catalana, una llana metálica, un capazo de goma y una carretilla.

- Báscula

Se utiliza una balanza con un límite de peso máximo de 20kg y una precisión de ± 1gr; para poder realizar correctamente las dosificaciones basándonos en los pesos y porcentajes respectivos de cada material.





#### 4.3.2 Realización de probetas cilíndricas

Las probetas se han realizado mediante moldes cilíndricos metálicos de 15 centímetros de diámetro y 30 centímetros de altura, como ya habíamos mencionado anteriormente, manteniendo una relación de esbeltez  $\frac{1}{2}$ .

El proceso de fabricación lo hemos dividido en 4 días distintos, debido a la gran cantidad de probetas a realizar, fabricando así 7 probetas los tres primeros días y 6 el último día, en una hormigonera de 150 litros de capacidad.

Las fases del proceso de ejecución serían las siguientes:

- Limpieza y puesta a punto del material y utensilios a utilizar: limpieza y aplicación de desencofrante en los moldes.

- Preparación de las dosificaciones de cada material: 12,5kg de grava(5-11), 12,5 kg de grava (11-22), 2,5kg de arena (0-5), 13,24kg de cal CL90, 22,5kg de chamota y 17,1kg de agua; consiguiendo, con estas cantidades, el suficiente hormigón para poder realizar una serie de siete probetas.

- Humedecer las herramientas y maquinaria que va a estar en contacto con el hormigón, de tal manera que no absorba el agua perteneciente al compuesto.

- Introducción de los materiales en la hormigonera con el orden siguiente: agua, cal, chamota, arena y gravas; este orden es debido a la necesidad de la cal de ser bien amasada, primeramente ella sola y después acompañada de la chamota para mezclarse correctamente.

- Introducción del agua en la hormigonera hasta conseguir la consistencia blanda, siempre intentando mantener una relación de agua baja pero teniendo en cuenta la trabajabilidad del hormigón.

- Realización del cono de Abrams, para determinar que nuestro hormigón tiene la consistencia blanda que estamos buscando.

- Llenado de los moldes de las probetas, realizado en tres tongadas con su correspondiente vibrado en cada una de ellas.

El vibrado ha sido realizado según normativa específica y de la siguiente manera:

- a. Se coloca el hormigón en tres capas de igual espesor en los moldes cilíndricos.

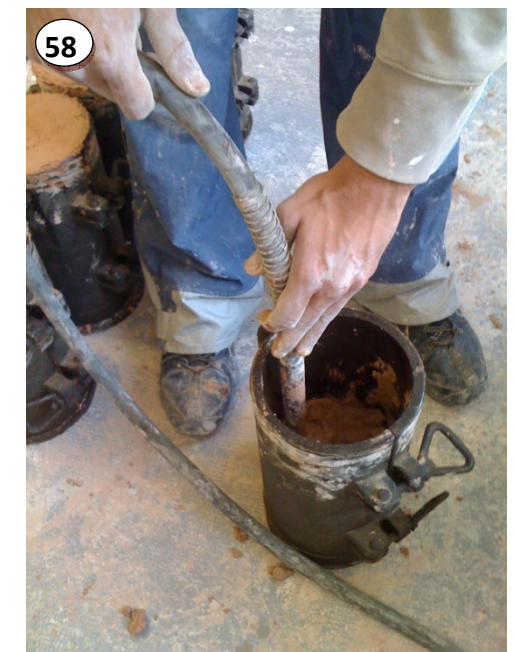
- b. Se vibran las capa de los moldes cilíndricos con una inserción en la zona central.

- c. El vibrador se introduce verticalmente en la capa inferior, hasta aproximadamente 2 cm del fondo y en la capa superior hasta, que penetre aproximadamente 2 cm en la capa subyacente. El vibrado debe realizarse sin tocar con el vibrador las paredes ni el fondo del molde.

- d. El vibrador se retira tan lentamente como sea posible, rellenando la última capa con hormigón de modo de mantener el molde constantemente lleno y hasta que una delgada capa de lechada cubra la superficie.

#### 4.3.3 Ensayo de asentamiento (cono de Abrams)

El ensayo del asentamiento con el cono de Abrams se rige por la norma UNE-EN 12350-2:2006. Este tipo de ensayo es muy fácil de realizar en obra, no siendo necesario ni un equipo costoso ni un personal especializado, pero si obteniéndose unos resultados satisfactorios. De ahí que, con pequeñas variaciones entre unos países y otros, sea universalmente aceptado. Su objetivo es determinar la consistencia de un hormigón y se considera adecuado cuando la medida del asentamiento oscila entre 1cm y 20cm. Si los valores son superiores, deben tenerse en cuenta otros métodos de medida de la consistencia. Tampoco es aceptable si el asentamiento continua produciéndose un minuto



CONSISTENCIA	ASIENTO (cm)	TOLERANCIA (cm)	CLASE
Seca	0-2	0	S1
Plástica	3-5	±1	S2
Blanda	6-9	±1	S3
Fluida	10-15 o >15	±2	S4 o S5



después del desmolde o si el tamaño máximo del árido es superior a 40mm.

El fundamento del método es muy simple; el hormigón fresco se compacta en un molde con forma de tronco de cono y cuando el molde se saca levantándolo en dirección vertical, el descenso producido por el asiento del hormigón da una medida de la consistencia. El molde, de acuerdo con la norma UNE-EN anteriormente citada, tiene que ser de metal que no sea fácilmente atacable por la pasta de los conglomerantes y con un espesor superior a 1,5mm. Sus dimensiones interiores son de 200mm±2mm como diámetro de la parte superior y una altura de 300mm±2mm. La base y la parte superior del molde deben estar abiertas y paralelas entre si existiendo dos asas en la parte superior y dos grapas de fijación en la parte inferior.

El procedimiento consiste en humedecer el molde y la bandeja o chapa que se coloca en la base, situar el molde sobre la bandeja en una superficie horizontal y llenarlo en tres capas, de tal forma que cada capa ocupe aproximadamente 1/3 de la altura del molde una vez compactado el hormigón (durante el proceso de llenado hay que sujetar firmemente el molde). Cada capa se compacta con 25 golpes, los cuales se realizan con una barra compactadora de acero normalizada y distribuyéndose uniformemente en la sección transversal de cada capa. En el llenado de la última capa se procura que el hormigón rebose antes de comenzar el proceso de compactado, después de compactar la última capa se retira el hormigón sobrante con una acción de corte y rodillo de la barra compactadora.

A continuación, se levanta, con cuidado, el molde en dirección vertical, en una operación que no debe durar más de 5 o 10 segundos y sin efectuar ningún movimiento lateral o de torsión. La operación completa tiene que llevarse a cabo de forma ininterrumpida y en un plazo no superior a dos minutos y medio. Justo después de retirar el molde, se mide el asentamiento como la diferencia entre la

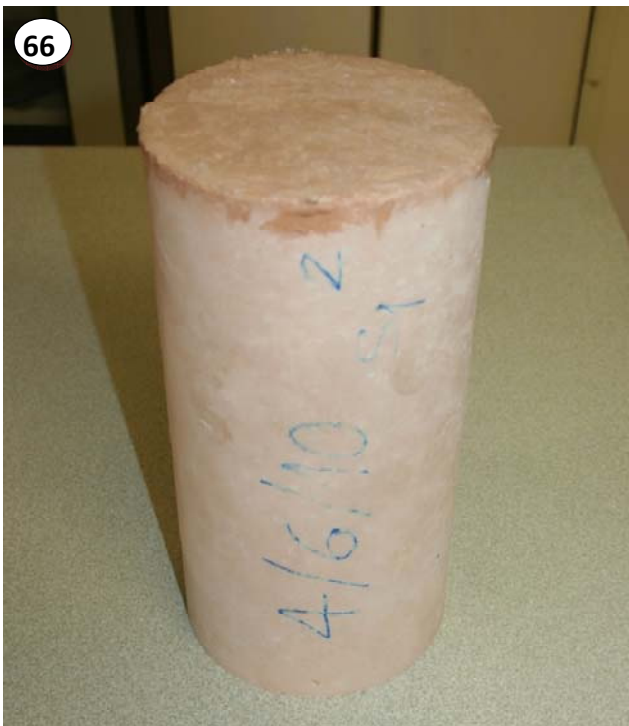
altura del molde y la del punto más alto de la muestra de hormigón asentada redondeando el valor a los 10 milímetros. El ensayo únicamente es válido si se produce un correcto asentamiento de la masa de hormigón, entendiéndose como tal un asentamiento en el que el hormigón permanece sustancialmente intacto y de forma simétrica. Si se produce un deslizamiento lateral de la muestra, es obligatorio tomar otra muestra y repetir el ensayo.

Según la EHE las distintas consistencias y los valores límite de los asientos correspondientes son los que se indican en la siguiente tabla, incluidas también las tolerancias.

El cono de Abrams es un sistema de control en obra muy útil, ya que permite detectar fácilmente cambios entre diferentes masas, bien sean debidos a variaciones de agua de amasado, a la humedad de los áridos o a la granulometría de estos, principalmente de las arenas, por lo que se convierte en un ensayo que permite verificar la regularidad de los materiales. La consistencia de un hormigón destinado a armado es blanda, si el hormigón se va a bombera se emplea la fluida y si el hormigón es visto es recomendable emplear consistencia plástica, siempre que pueda ponerse en obra y compactarse adecuadamente.

Asi que nuestro hormigón esta entre valores de 6-9cm, es decir una consistencia blando.





#### 4.3.4 Ensayo para la determinación de porosidad y densidad.

Se determina la densidad aparente del hormigón endurecido ( $D_a$ ), así como la densidad relativa ( $D_r$ ) y el índice de porosidad accesible del material en %. La  $D_r$  se determina descontando el volumen de la red porosa del material, lo que permitirá a su vez determinar el % de poros.

Se ha variado o complementado el método operatorio de la norma UNE-EN 1015-10, ya que esta norma solo nos permite determinar la  $D_a$ . En este caso también se ha tomado como referencia la UNE de piedra natural.

Dispositivos: Horno de secado; campana de vacío con sistema de llenado de agua desmineralizada y conectada a un vacuometro digital con sensibilidad de 0,1 mbar; bomba de vacío modelo RZ 2.5 de VACUUMBRAND provista de captador de humedad de nitrógeno líquido GKF 100i; bascula con sensibilidad de 0,01 gr y pesa hidrostática.

Procedimiento operatorio: de los 3 ambientes mencionados; carbonatación acelerada; sumergidas en  $H_2O$ ; y ambiente del laboratorio, como marca la UNE-EN 1015-10, se secan en estufa a  $80 \pm 5^\circ C$  hasta la que la variación de masa resulte inferior al 0,1%.

Se pesan las muestras desecadas y se anotan las lecturas. A continuación se introducen las muestras debidamente referenciadas en la campana de vacío y se activa la bomba de vacío. Esta bomba permite crear una depresión atmosférica de hasta 8 mbar en la campana en pocos minutos.

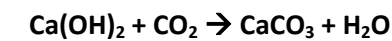
Una vez conseguido el vacío se activa el sistema de llenado de agua de manera que inunden las muestras muy lentamente. Al verificar que el nivel del agua rebasa unos 15mm la altura de las muestras se deja el equipo en funcionamiento durante 5 horas. Transcurrido este tiempo procedemos a las pesadas.

Lo que se consigue mediante este sistema es eliminar el aire que hay en la red porosa accesible, para que luego se puedan llenar completamente de agua, lo que posteriormente servirá para determinar la  $D_a$ , la  $D_r$  y el índice de porosidad accesible de cada producto.

A continuación se pesan todas las muestras con la báscula y la báscula hidrostática anotando el peso saturado así como el peso hidrostático. Conociendo estos pesos y el VA (medición previa al ensayo) se procede a elaborar el informe correspondiente.

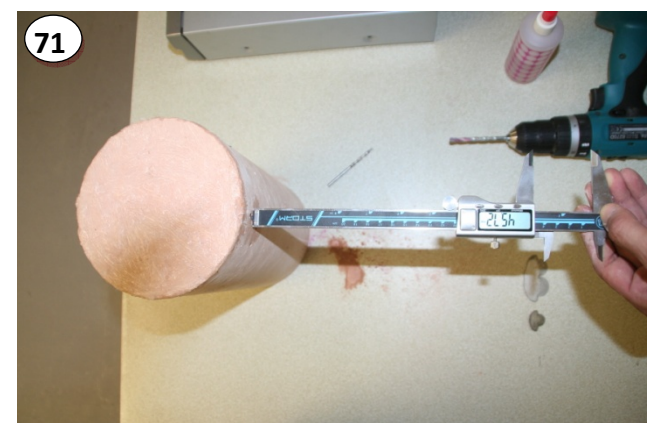
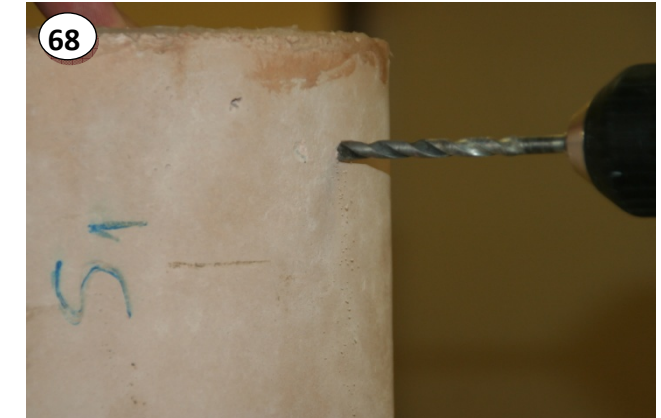
#### 4.3.5. Determinación de la profundidad de carbonatación.

La carbonatación es un proceso superficial ligado a las concentraciones de  $CO_2$  presentes en el aire, a la presencia de humedad y a la temperatura ambiente. El contenido de dióxido de carbono en aire oscila entre el 0.03%, alcanzando valores superiores al 0.10% en atmosferas agresivas. Este proceso físico-químico derivado de la reacción entre el dióxido de carbono del aire y el hidróxido cálcico libre.



En el caso de las probetas cilíndricas de 150mmx300mm de altura que se introdujeron en la cámara de  $CO_2$  y de las que se dejaron en ambiente de laboratorio, se han escogido aleatoriamente una probeta de cada uno de los dos ambientes para determinar su grado de carbonatación. Para este proceso realizamos diferentes perforaciones con la ayuda de un taladro eléctrico en cada una de las dos probetas para poder así, mediante un pie de rey digital, medir hasta que profundidad aproximada podían estar carbonatadas aplicándole fenofaleina según íbamos avanzando en la perforación..

Para cerciorarnos hasta que profundidad se habían carbonatado se aplico una capa de silicona en la parte superior para así conseguir que la evolución de la carbonatación de la probeta fuese solo por su perímetro lateral.







#### 4.3.6. Determinación de absorción de agua por capilaridad

Para determinar el coeficiente de absorción capilar del hormigón endurecido hemos seguido las pautas de la norma UNE referente a piedra natural, en lugar de la UNE EN-1015-18 que normaliza la absorción capilar de morteros y hormigones endurecidos de cemento Portland. El motivo es que la normativa utilizada es mucho más completa por lo que respecta al volumen de toma de datos, y por lo tanto permitirá afinar mucho más el resultado final. Mientras que la norma de hormigones y morteros de albañilería indica llevar a cabo dos controles de peso durante el ensayo, que durará un total de 90 minutos, la norma que hemos utilizado seguirá el mismo procedimiento pero se realizarán 13 pesadas en un tiempo total de 24 horas.

Procedimiento operatorio: Hemos escogido 3 probetas de exposiciones ambientales diferentes para llevar a cabo este ensayo. Antes de iniciar el ensayo se secan en una estufa a  $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta que se estabiliza su masa.

Se prepara una gaveta con unas falcas de caucho que permitirá apoyar las probetas sin obstruir la cara inferior de estas, y se llena con agua desmineralizada hasta asegurar que el nivel de agua cubrirá la base de las probetas entre 15 y 20 mm.

Antes de iniciar el ensayo se pesan todas las probetas y se anota este peso seco. También se calcula el área de succión.

Se introducen las probetas en la gaveta con agua y se llevan a cabo los controles de peso que define la norma referenciada. Estos controles se realizarán en los minutos nº: 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 121, 225, 400 y 1.444. Las 12 primeras pesadas tendrán lugar el mismo día y la última pesada a las 24 horas de iniciar el ensayo, al día siguiente.

El control de peso se lleva a cabo con una báscula de sensibilidad de 1g. Se anotan todas las lecturas y se calcula el incremento de masa en  $\text{Kg}/\text{m}^2$ . Con este dato se elabora una recta de regresión y su pendiente indicará el coeficiente de absorción capilar.

Al igual que en el resto de ensayos realizados con hormigón, también se destinaron probetas sometidas a carbonatación acelerada.

#### 4.3.7. Determinación de desorción

Para este ensayo hemos seguido igualmente la norma UNE referente a la piedra natural, ya que también se trata de una norma más completa que la de morteros y hormigones endurecidos.

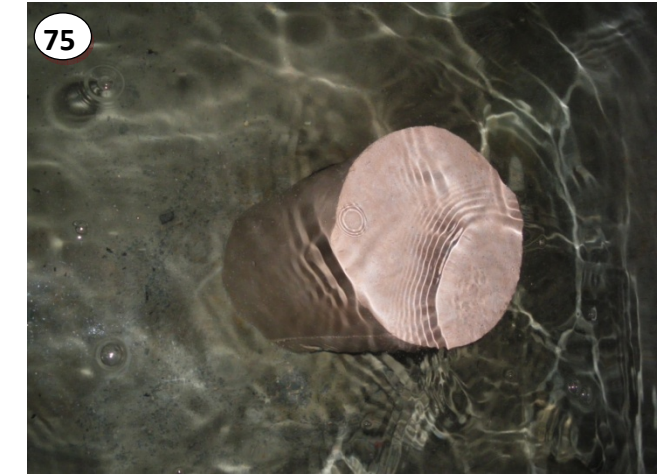
Procedimiento operatorio: Las probetas utilizadas en el anterior ensayo, absorción de agua por capilaridad, se han utilizado para la realización de este ensayo. Anteriormente al inicio del ensayo se han sumergido las 3 probetas en agua desmineralizada, hasta conseguir una masa estable.

Es necesario para realizar este ensayo, mantener la temperatura y la humedad relativa del aire constantes a lo largo de todo el proceso. Para lograr estas condiciones hemos realizado el ensayo en un habitáculo cerrado, y así de esta manera no alterar los resultados obtenidos.

Una vez se han extraído las probetas sumergidas del agua, se pesan para determinar su masa saturada de agua, a partir de este momento se inician una serie de controles de peso con los siguientes parámetros de tiempo en minutos entre cada uno de ellos: 1, 9, 16, 36, 49, 64, 81, 121, 225, 361, 529, 1444, 1936, 2916, 3364 y 4356.

El control de peso se lleva a cabo con una báscula de sensibilidad de 1g. Se anotan todas las lecturas y se calcula el incremento de masa.

Habiendo obtenido los pesos, tanto el saturado de agua como el peso seco de las probetas hemos creído conveniente determinar también el peso hidráulico para así obtener el índice de porosidad, la densidad relativa y la aparente.





#### 4.3.8. Determinación de la resistencia a compresión.

El ensayo consiste en la rotura de probetas cilíndricas de hormigón a solicitud de compresión utilizando los medios y la metodología que se indica seguidamente.

La normativa actual para la rotura a compresión está comprendida en las siguientes normas:

UNE 83-304-84, EN 12390-4-2000, UNE 83-301, UNE 83-303, UNE 83-302, EHE.

Para determinar la resistencia a compresión de las probetas realizadas se ha utilizado un calentador de azufre; marca Incotecnic de 1500w de potencia, capaces de llegar a 200°C de temperatura, y un voltaje de 220 voltios. El azufre está sublimado en flor especial para industria con una riqueza del 99,9% de azufre. El dispositivo de compresión utilizado es una prensa Suzpecar de 200 Tn de carga máxima, esta prensa está dotada de regulación de cargas que permite aumentarlas de forma continua y sin saltos bruscos. Además la máquina dispone de dos platos de acero, planos y rectificadas, la dimensión de estos será, como mínimo, superior en un 3% al diámetro de la probeta a ensayar, estos también tienen marcas, guía acanalada, de forma que permitan el correcto centrado de la probeta, con un espesor suficiente para garantizar que no se deformen durante el ensayo, considerando el espesor mínimo en 25 mm. El plato superior está sobre una rótula esférica que permite efectuar giros de al menos 4° en el entorno del eje vertical y de cualquier valor en el eje horizontal. El centro de la esfera de la rótula ha de coincidir con el centro de la superficie de apoyo del plato superior sobre la probeta y, a la vez, coincidir con el centro del plato inferior.

La lectura de cargas se realiza con una precisión del 1% del resultado del ensayo. El sistema de lectura dispone de un indicador de la carga máxima a la que se ha llegado.

Previamente a la rotura a compresión las probetas se han refrentado debidamente, con el siguiente proceso: fusión del azufre a 100°C con el calentador anteriormente mencionado y una vez tenemos el azufre en estado líquido se rellena el molde, rápidamente a continuación se encara la probeta en el molde con tal que la cara refrentada sea totalmente ortogonal a las directrices de la probeta cilíndrica. Una vez frío y endurecido, el azufre se desmolda cuidadosamente la probeta, lista para ser ensayada.

La probeta se coloca de forma muy cuidadosa en el plato inferior centrándola con ayuda de las marcas de referencia. Acto seguido se aproximan los platos de la prensa de forma que el superior se coloque perfectamente en la cara superior de la probeta sin atribuirle carga a ésta.

A continuación se aplica la carga, de forma continua y sin choques bruscos, hasta que la probeta deforme rápidamente, entonces se anota la carga máxima obtenida en el momento de rotura.

Hay que tener precaución ya que un mal funcionamiento de la rótula de la máquina o probetas mal refrentadas, puede comportar desviaciones importantes de los resultados obtenidos.

#### 4.3.9 Determinación de la retracción

La retracción es el cambio de volumen (disminución) que sufre el hormigón durante el fraguado y el comienzo del endurecimiento, sobre todo cuando existe una ausencia de agua en el material. Por otro lado, el hormigón también puede incrementar su volumen, en este caso por la absorción de agua de los geles originados en el cemento hidratado. En cuanto a la retracción, se suelen considerar tres tipos diferentes: plástica, de secado y de carbonatación. La retracción plástica tiene lugar durante los primeros momentos, antes de que finalice el proceso de fraguado (primeras





ocho horas), de ahí su nombre, pues durante este tiempo el hormigón está en estado plástico; los valores de esta retracción suelen ser del 1% respecto al del cemento seco y pueden aumentar, expresándose en forma de muchas fisuras próximas, cuando se produce una evaporación rápida del agua superficial. En nuestro hormigón la retracción de secado es donde el hormigón sufre una retracción mayor, esta se genera cuando el hormigón a fraguado y se encuentra en un ambiente no saturado, perdiendo así agua. Se realizaron diferentes planchas de hormigón de diferentes geometrías de cada amasada pudiendo observar así los valores de retracción por secado más característicos que resultaron estar alrededor del intervalo 0,95-1,15cm/m. Por último, la retracción de carbonatación es aquella que se origina por la carbonatación de los productos hidratados, debido a la acción del CO<sub>2</sub> de la atmosfera, y tiene lugar durante el proceso de endurecimiento o al final de este. Aunque cuantitativamente no es tan importante como la de secado, se superpone a ella, incrementando su valor este proceso tiene lugar en su máxima expresión con humedades relativas entre el 50 y el 60%, siendo casi despreciables en valores extremos, es decir humedades muy altas o muy bajas.

En cuanto al entumecimiento se produce cuando el hormigón está permanentemente sumergido en agua, generándose, un incremento de volumen por la absorción de agua por los geles, lo que produce su esponjamiento y aumento de volumen.

#### 4.3.10. Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos x permite analizar la composición de materiales cristalinos de un modo muy exacto mediante el estudio de la intensidad y ángulo de difracción de un haz de rayos x proyectado sobre la muestra ensayada.

Dado que se trata de un ensayo económicamente muy costoso, solamente se ha solicitado la DRX de la chamota utilizada.

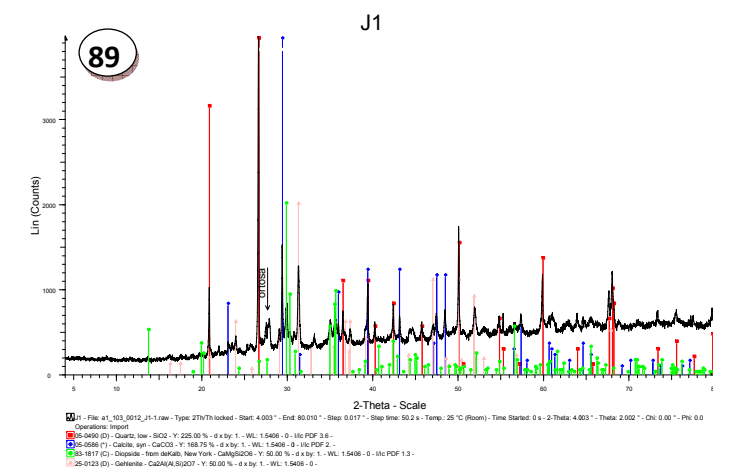
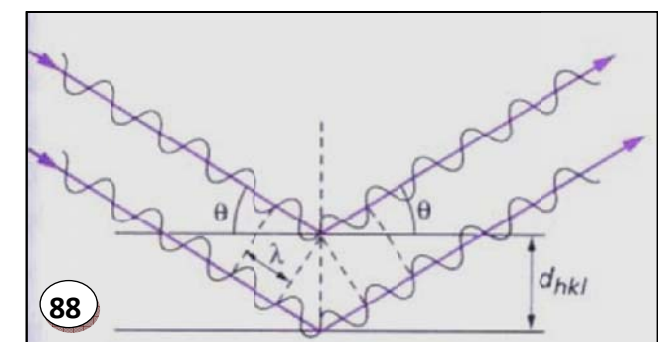
Preparación de la muestra: La muestra destinada a la DRX es la fracción fina de la chamota. Se tamiza con el tamiz 0,063, conservando esta fracción fina en un recipiente plástico de cierre hermético.

Procedimiento operatorio: Tal y como se ha mencionado en el inicio de este apartado, el difractómetro proyecta un haz de rayos x sobre la muestra, de modo que las estructuras cristalinas de este material hacen que la radiación rebote y se difracte en un ángulo determinado con mayor o menor intensidad. El espectro obtenido se contrasta con patrones de ángulo e intensidad de difracción de cristales conocidos. e esta manera se interpreta la composición de las estructuras cristalinas de la muestra ensayada. La imagen es el resultado de una DRX de la chamota utilizada en el estudio. Las líneas verticales de diferentes colores son los patrones conocidos y la línea gruesa de color negro que discurre horizontalmente es el resultado de la muestra ensayada. En el momento que coinciden en altura significa que algún componente cristalino de la muestra queda identificado.

La DRX realizada a la chamota indica que está compuesta por gehlenita, calcita y diópsido. En el proceso de cocción de la cerámica unos minerales se destruyen y otros se forman: la calcita se descompone a 780°C; la gehlenita se forma entre 650-800°C y el diópsido se forma a partir de 750°C.

La temperatura mínima de inicio de la formación de la pasta cerámica de la arcilla es a partir de 800°C.

Por tanto la co-presencia de la calcita (que se descompone antes del proceso cerámico) y de la gehlenita y diópsido nos indica que el proceso cerámico no se ha realizado homogéneamente.





#### 4.4 Dosificación a estudiar

Finalmente después de realizar todos los ensayos y estudios pertinentes, la dosificación elegida para realizar las 4 series de probetas se trata de una relación cal-chamota de 1/1,7 y un porcentaje de grava grande (11-22) del 25%(12,5kg) , un 25%(12,5kg) de grava pequeña (6-12), un 5%(2,5kg) de arena (0-5) y un 45%(22,5kg) de chamota, incluyendo 13,24 kilos de cal y 17,1kg de agua; para así poder conseguir una consistencia blanda.

Estas cuatro amasadas han sido clasificadas en cuatro series diferentes según su día de fabricación que son:

- 28/05/2010 (7 uds)
- 31/05/2010 (7 uds)
- 01/06/2010 (7 uds)
- 04/06/2010 (6 uds)

Una vez realizadas todas las probetas se procedió a someter algunas de ellas en ambientes diferentes al del laboratorio, para así poder estudiar también el comportamiento de estas delante de ambientes y situaciones diferentes.

El primer grupo de tres probetas se decidió sumergirlas en agua justo a continuación de su desmolde, estas son la número 1, 2 y 3 de la serie del 01/06/2010, y así observar las características de estas probetas que han tenido única y exclusivamente un fraguado hidráulico .

El segundo grupo, también de tres probetas, se introdujeron en la cámara de CO<sub>2</sub>, para poder llegar a observar hasta que punto podía ser beneficioso, para una carbonatación acelerada, el introducirlas en dicha cámara la cual les provoca que estas sufran un fraguado aéreo y así poder llegar a obtener resultados mayores en cuanto a su resistencia a compresión se refiere.



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Valoración de los resultados obtenidos

**5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

**Primeras aproximaciones**

En este apartado se exponen y se comentan los resultados que hemos ido obteniendo en los diferentes ensayos y análisis realizados, a los materiales utilizados y al hormigón elaborado.

Las tablas que se exponen a continuación ofrecen los resultados del análisis granulométrico, de las muestras de áridos recogidas en la gravera.

Determinación granulométrica de los áridos y chamota individualmente.

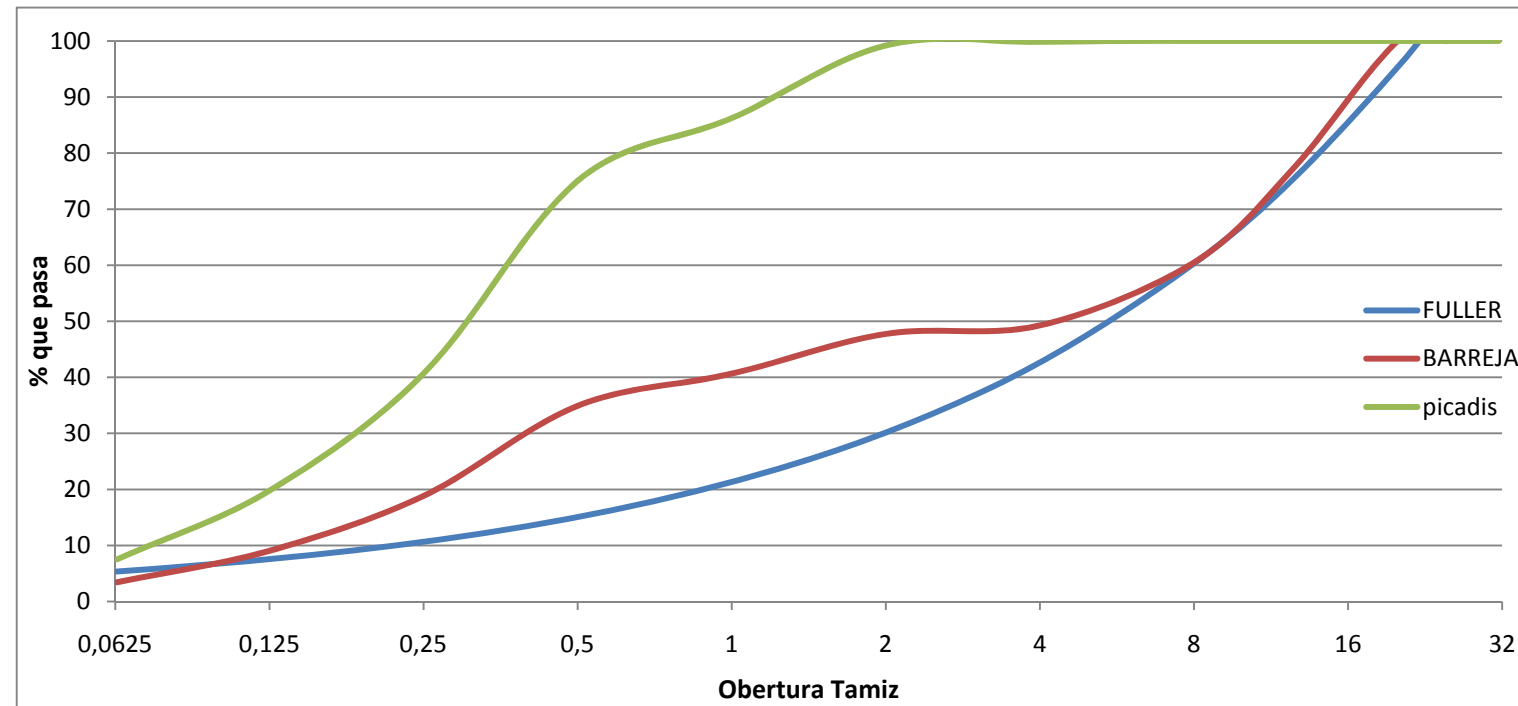
Después del análisis granulométrico de cada árido, se estudio la granulometría de la mezcla de cada uno de ellos para obtener una granulometría ajustada a la curva de Fuller.

La mezcla se basa en 2 tipos de grava (grava D y grava E) y uno de arena (arena B). Después del estudio de estas se decidió una granulometría que dio como resultado la siguiente grafica.

La mezcla obtenida no se ciñe demasiado a la curva de Fuller, debido a que la mezcla esta compuesta por una parte elevada de chamota, esta como se puede observar en el grafico tiene una curva totalmente opuesta a la de Fuller por tanto resulta practicamente imposible adaptarse a la perfección a dicha curva; no obstante se consiguió adaptar una mezcla la cual coincidía bastante en su inicio y su final, pero que se destaca bastante de ella en su parte central. Observamos que si adoptabamos una dosificación bastante equitativa de cal y chamota, por ej: una 1/1, la curva de la muestra seguía a la perfección en todo su recorrido a la de Fuller, ya que bajabamos sustancialmente la cantidad de chamota, pero como contraprestación obteníamos unas resistencias mecánicas demasiado bajas para nuestras pretensiones.

% que pasa						
	Grava D	Grava E	Arena B	Grava C	Grava F	Arena A
Diámetro	11/22	6/12	0/5	8/22	4/10	0/5
25	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100
12,5	9	100	100	100	100	100
8	0	42	100	68	100	100
4	0	1	82	1	64	90
2	0	1	57	1	14	60
1	0	0	37	0	1	34
0,5	0	0	23	0	0	19
0,25	0	0	11	0	0	8
0,125	0	0	3	0	0	1
0,063	0	0	1	0	0	0
Finos	0	0	0	0	0	0

CHAMOTA			
Peso retenido	Peso acumulado	% que pasa	Tamiz
0	0	100	25
0	0	100	20
0	0	100	12,5
0	0	100	8
0,9	0,9	100	4
2,5	3,4	99	2
56,87	60,27	86	1
48,89	109,16	75	0,5
150,43	259,59	41	0,25
91,31	350,9	20	0,125
53,56	404,46	8	0,063
32,93	437,39	0	-
437,39	-	-	-



A continuación nos interesaba saber que relación de cal y chamota nos podía aportar una resistencia mayor, para esto se realizaron probetas de las diferentes pastas de cal y chamota que posteriormente a su amasado se introdujeron en bolsas herméticamente cerradas; este análisis no nos iba a aportar ningún resultado numerico exacto pero si que nos podía encaminar por donde podíamos llegar a encontrar los resultados más favorables en cuanto al fraguado hidraulico se refiere. Al mismo tiempo, con las amasadas de las diferentes dosificaciones realizamos tambien probetas cilindricas de pequeño tamaño, ya citadas en apartados anteriores, éstas si que fueron ensayadas a compresión dando valores diversos que se muestran en la siguiente tabla.

TABLA DE ROTURAS A COMPRESIÓN PASTA CAL/CHAMOTA			
DOSIFICACIONES	SUP. (cm2)	CARGA(kg)	$\sigma$ (kg/cm2)
1/0,8	10,694	529	49,5
1/0,9	10,555	427	40,5
1/1,0	10,578	494	46,7
1/1,1	10,578	740	69,9
1/1,2	9,898	592	59,8
1/1,3	10,636	476	44,7
1/1,4	10,406	619	59,5
1/1,5	10,694	784	73,3
1/1,6	10,694	1033	96,6
1/1,7	10,694	1161	108,6
1/1,8	10,636	1095	102,9

■ 13 días ambiente laboratorio + 10 días cámara CO2  
■ 7 días ambiente laboratorio + 10 días cámara CO2

Como se puede observar en la tabla los resultados de rotura a compresión van en aumento según aumenta también la relación cal/chamota hasta llegar a la dosificación que da un valor más elevado, esta, es la de relación 1/1,7 de cal respecto a la chamota, obteniendo la siguiente dosificación la 1/1,8 un resultado ya inferior al anterior.

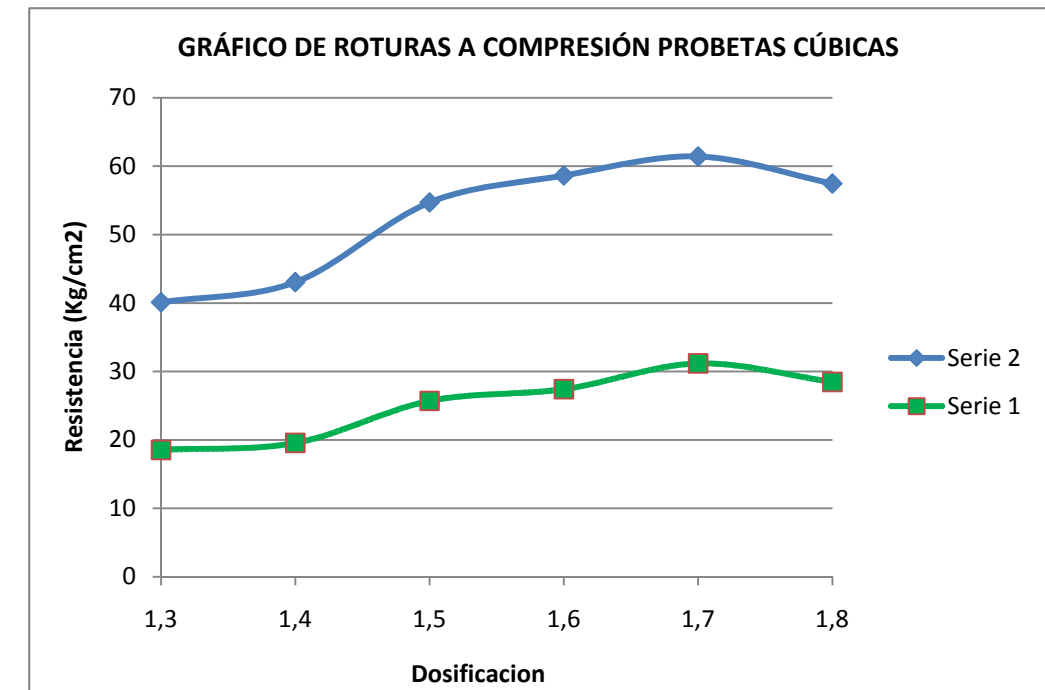
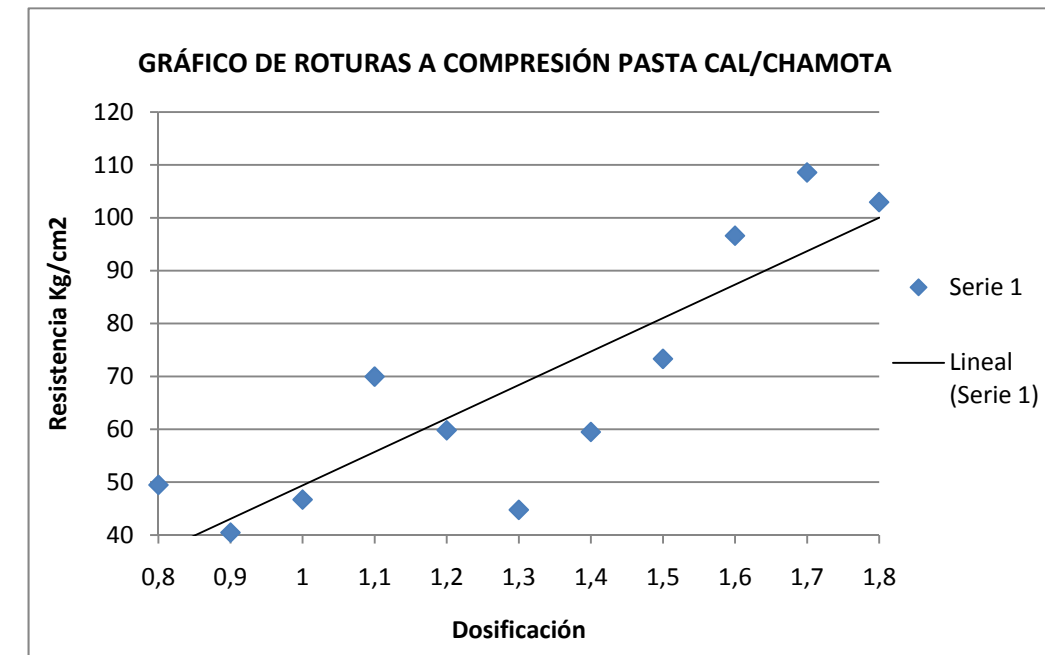
Así pues, los resultados nos decidieron a elegir la dosificación 1/1,7 de cal respecto a chamota como nuestra dosificación base, a partir de la cual teniendo las gravas y aridos elegidos, empezariamos el siguiente proceso, que fue realizar probetas cubicas con la mezcla completa, es decir, incluyendo los aridos con la cal y la chamota, para determinar si seguia produciondoso este aumento de resistencia a compresión a la vez que aumentaba la relación cal/chamota.

Una vez realizadas las probetaas cubicas de 70x70x70mm y ensayadas a compresión se obtuvieron los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

TABLA ROTURAS A COMPRESIÓN PROBETAS CÚBICAS			
DOSIFICACIONES	SUP. (cm2)	CARGA(kg)	$\sigma$ (kg/cm2)
1/1,3	50	927	18,54
1/1,4	50	978	19,56
1/1,5	50	1285	25,7
1/1,6	50	1371	27,42
1/1,7	50	1559	31,18
1/1,8	50	1424	28,48
1/1,3 (2)	50	2006	40,12
1/1,4 (2)	50	2153	43,06
1/1,5 (2)	50	2735	54,7
1/1,6 (2)	50	2932	58,64
1/1,7 (2)	50	3071	61,42
1/1,8 (2)	50	2873	57,46

■ 7 días ambiente laboratorio + 27 días cámara CO2  
■ 120 días ambiente laboratorio

Como se puede observar, los resultados van en aumento según aumenta también la relación de chamota respecto a la de cal, hasta llegar a la dosificación 1,7 que da el valor máximo, a partir de



ahí la de dosificación superior ya da un resultado inferior. Esto nos confirma los resultados del ensayo anterior ya que ha vuelto a suceder exactamente lo mismo, lo cual es una corroboración para nosotros para seguir trabajando con la dosificación 1/1,7 de chamota respecto a la cal, ahora teniendo como añadido que los áridos y las gravas que le hemos añadido esta vez, no le han influido en lo que ha resistencia mecánica se refiere.

Después de estudiar estos resultados, decidimos que sería interesante saber, también, la porosidad y densidad real y aparente de cada dosificación, obteniendo los resultados que se muestran en la siguientes tablas.

Observamos que con relaciones de chamota mas elevadas se obtienen porosidades mas bajas esto puede suceder por dos hipótesis distintas: la primera sería debida a que la reacción puzolánica producida por la chamota y la cal crea una estructura porosa menor, la segunda hipótesis estudiada podría ser debido a que la porosidad de la chamota es inferior a la de la cal, por lo tanto a mayor contenido de chamota y menor de cal, por consecuencia, la porosidad disminuye. Estas 2 hipótesis podrían tener lugar al mismo tiempo. De la misma manera también se consideraría otra nueva hipótesis, debido a la fisuras de retracción producidas en su fraguado, estas fisuras disminuyen en cantidad y tamaño al incrementar la dosificación de chamota en el compuesto. Esto sucede con las 3 series estudiadas en distintos ambientes. En el ambiente de la serie 1 (15 días ambiente laboratorio + 10 días CO<sub>2</sub>) se observan valores inferiores en cuanto su porosidad, respecto las otras series, debido a la reacción producida durante su carbonatación acelerada en la cámara de CO<sub>2</sub>. En otro rango de valores, encontraríamos también, en cuanto a su porosidad se refiere, la serie 2 (28 días ambiente laboratorio), estos valores son sensiblemente superiores a los obtenidos en la serie 1, ya que en el ambiente

TABLA DE POROSIDADES Y DENSIDADES DE LAS PROBETAS REALIZADAS CON PASTA – SERIE 1						
Serie 1	Pes hidro.	Pes sat.	Pes sec	Dens. apar.	Dens. rel.	Porositat
0,8	5,74	10,44	7,39	1,29	2,75	53,1
0,9	10,91	19,85	14,13	1,30	2,72	52,4
1	6,34	11,45	8,23	1,30	2,64	50,8
1,1	11,5	21,3	15,37	1,34	2,76	51,6
1,2	10,17	18,62	13,33	1,31	2,73	52,0
1,3	5,22	9,61	6,97	1,34	2,70	50,6
1,4	12,55	23,5	17,18	1,37	2,76	50,4
1,5	24,4	45,84	33,88	1,39	2,72	49,0
1,6	24,3	45,63	33,83	1,39	2,71	48,6
1,7	23,17	43,88	32,52	1,40	2,75	49,0
1,8	21,37	40	29,62	1,39	2,70	48,6

TABLA DE POROSIDADES Y DENSIDADES DE LAS PROBETAS REALIZADAS CON PASTA – SERIE 2						
Serie 2	Pes hidro.	Pes sat.	Pes sec	Dens. apar.	Dens. rel.	Porositat
0,8	5,54	9,4	6,14	1,11	2,69	58,8
1	6,37	10,12	6,9	1,08	2,19	50,5
1,3	2,07	3,71	2,57	1,24	2,76	55,1
1,4	6,62	11,83	8,14	1,23	2,78	55,7
1,5	7,87	13,99	9,79	1,24	2,67	53,4
1,8	6,45	11,7	8,32	1,29	2,71	52,4

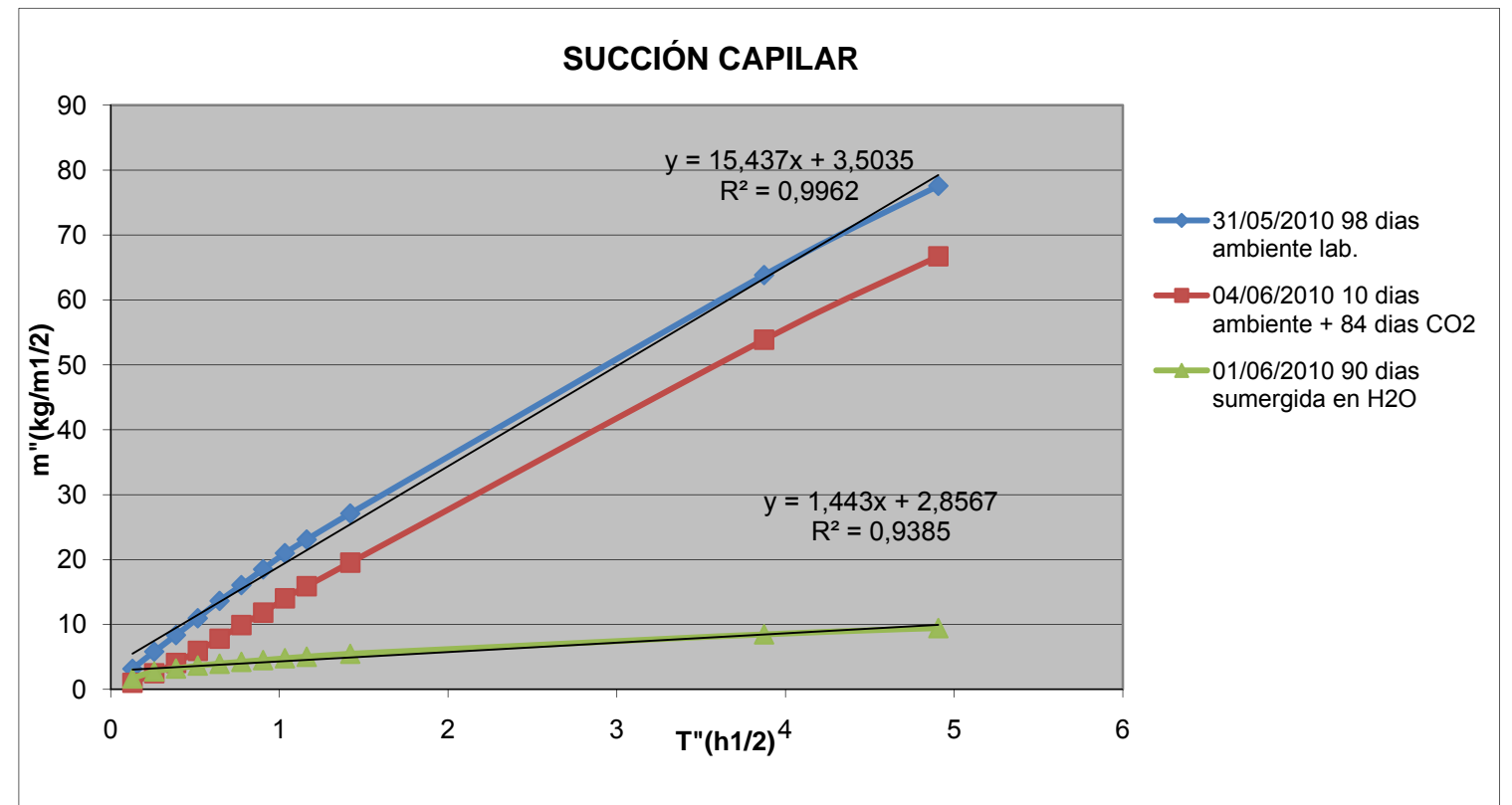
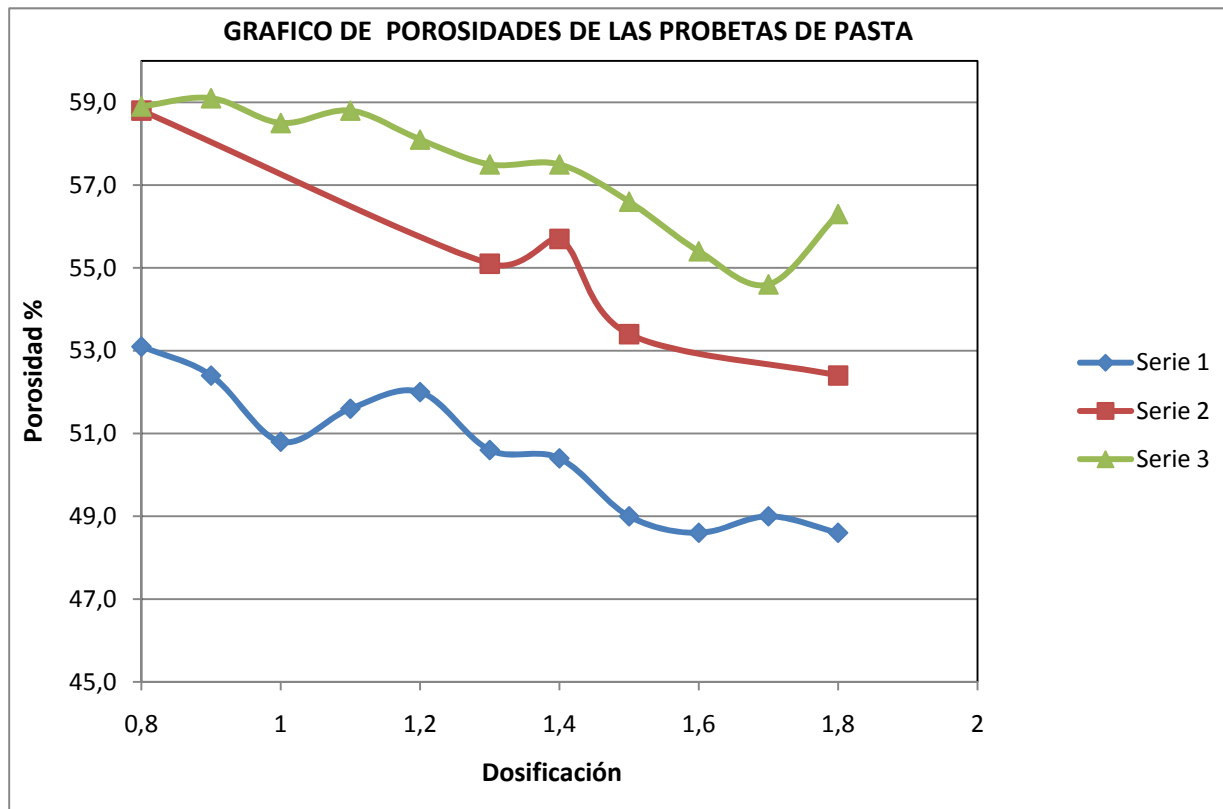
TABLA DE POROSIDADES Y DENSIDADES DE LAS PROBETAS REALIZADAS CON PASTA – SERIE 3						
Serie 3	Pes hidro.	Pes sat.	Pes sec	Dens. apar.	Dens. rel.	Porositat
0,8	12,21	20,22	13,03	1,07	2,60	58,9
0,9	4,86	8,13	5,26	1,08	2,64	59,1
1	5,59	9,41	6,14	1,10	2,65	58,5
1,1	4,03	6,84	4,47	1,11	2,69	58,8
1,2	7,83	13,33	8,78	1,12	2,68	58,1
1,3	5,06	8,72	5,81	1,15	2,70	57,5
1,4	5,06	8,83	5,92	1,17	2,75	57,5
1,5	4,01	7,08	4,81	1,20	2,76	56,6
1,6	12,7	22,25	15,21	1,20	2,69	55,4
1,7	11,98	20,94	14,4	1,20	2,65	54,6
1,8	4,58	8,26	5,68	1,24	2,84	56,3

donde han permanecido no han podido realizar una carbonatación completa.

En cambio las probetas en el ambiente de la serie 3, (fraguado hidráulico - bolsa), aun han dado valores de porosidad superiores a las anteriores series, esto sucede debido a que en su fraguado la probeta no le ha sido posible liberar el agua de amasado.

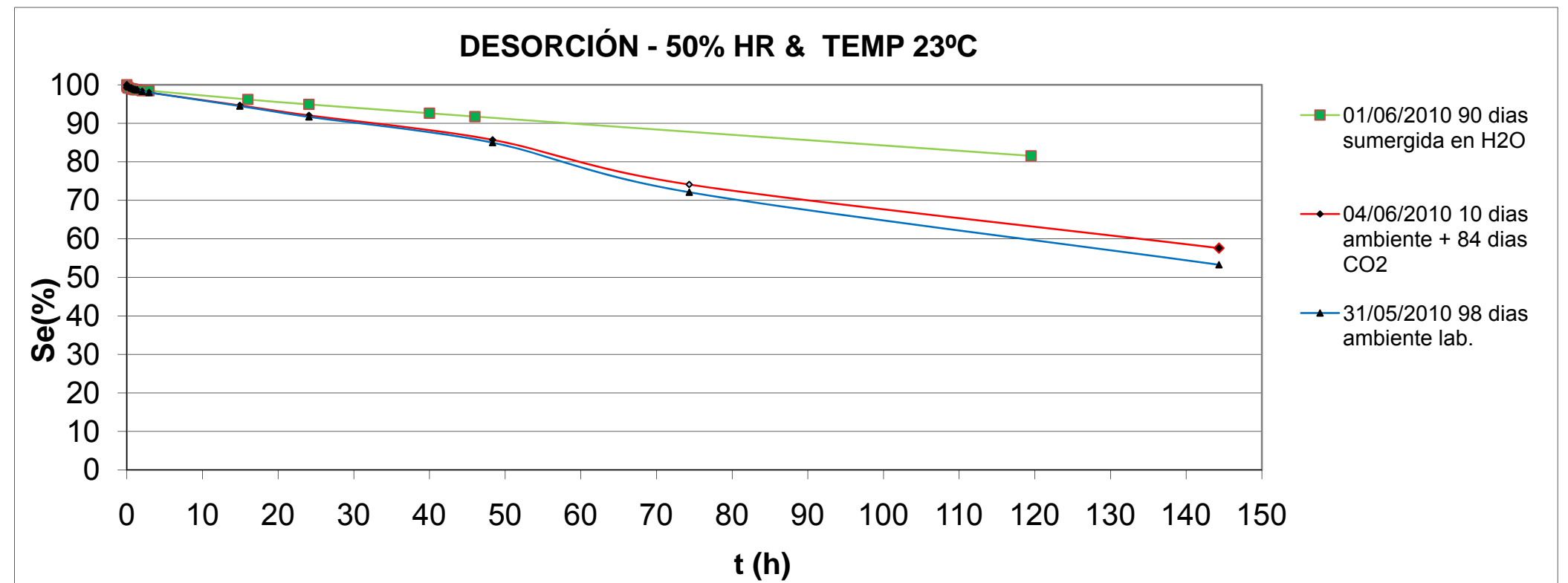
**Serie 1** 15 días ambiente laboratorio + 10 días CO<sub>2</sub>  
**Serie 2** 28 días ambiente laboratorio  
**Serie 3** fraguado hidráulico (bolsa)





**Succión capilar y desorción**

Los siguientes ensayos a realizar son los de succión capilar y desorción, estos ya se realizarán con las probetas cilíndricas definitivas realizadas para este proyecto, hemos podido observar que los resultados tanto de la succión como de la desorción son muy similares, tanto las que han estado en estado ambiente como las que estuvieron dentro de la cámara de carbonatación acelerada, en cambio, hay un cambio radical cuando los comparamos con las que han estado sumergidas en agua durante toda su etapa de fraguado y endurecimiento. En el gráfico de succión capilar se puede observar que apenas llega a alcanzar los 10 kg/m1/2 respecto los 66 y 78 kg/m1/2 que acaban obteniendo las otras dos; en cambio en la desorción también hay una diferencia notable pero menor a la de la succión, perdiendo un 20% de agua aproximadamente, respecto al 43% y 47% de las que estuvieron en ambiente laboratorio y camara de carbonatación.



### Resistencia a compresión

El último ensayo a realizar en este estudio ha sido el de resistencia a compresión, dando gran variedad de resultados dependiendo de las condiciones de fraguado y endurecimiento. También se observa que dependiendo de la pastada a que pertenezca cada probeta, se obtiene resultados bastante parecidos entre ellas, sin tener una gran variación de resistencia al de las otras pastadas.

Mención a parte hay que considerar las probetas que teniendo exactamente la misma dosificación y cantidad de agua que sus "hermanas" han conseguido su fraguado y su endurecimiento en conciciones diferentes a las del ambiente laboratorio (29°C y 50% humedad relativa), estas son:

- 01/06/2010 100 días sumergidas H2O + 12 días ambiente laboratorio
- 04/06/2010 : 10 días en ambiente laboratorio + 99 días en cámara de CO2

Según los precedentes que habíamos obtenido con las probetas anteriores y todos los ensayos que habían precedido a este momento, teníamos la intuición de que las probetas que íban a dar un mayor valor a compresión iban a ser las que habían estado dentro de la cámara de carbonatación acelerada, ya que sabíamos que estas estaban carbonatadas al 100% y eran las que, lógicamente teníamos que obtener un mayor valor de tensión en su rotura.

Siendo estos valores nada despreciables como se puede observar en la tabla, que van desde tensiones de 42,05 a 52,01 kg/cm<sup>2</sup>, teniendo en

cuenta de que nuestro compuesto no tiene el fin de trabajar y/o actuar como elemento estructural, se puede considerar un resultado aceptable.

Por contraposición a nuestras tesis iniciales, obtuvimos unos resultados de tensión mayores a ningunos otros en las probetas que habían estado durante 100 días sumergidas en agua.

Estas nos dieron valores que estaban comprendidos entre los 57,95 y los 62,81 kg/cm<sup>2</sup>, marcando estos incluso una diferencia considerable con las probetas que habían estado en la cámara de carbonatación.

Estas probetas al estar sumergidas durante todo este tiempo debajo del agua, no han estado en contacto con el CO<sub>2</sub> del ambiente, y por tanto no estaban carbonatadas, dando lugar a un proceso de endurecimiento puramente hidráulico.

Estos resultados nos indican que el fraguado hidráulico es más rápido que el aéreo, para llegar a obtener una carbonatación del 100%, ya que las probetas estuvieron 100 días sumergidas por los años necesarios para su carbonatación completa en ambiente laboratorio. También cabe destacar que la reacción hidráulica producida es superior en cuanto a resistencia a compresión que la reacción aérea.

Es aquí donde se valora realmente el verdadero poder de hidraulicidad de la chamota.

TABLA DE RESULTADOS ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS			
Identificación probeta	Carga (kg)	Superficie (cm <sup>2</sup> )	Tensión Kg/cm <sup>2</sup>
28/05/2010 (1)	2470	176,71	13,98
28/05/2010 (2)	2200	176,71	12,45
28/05/2010 (3)	2310	176,71	13,07
28/05/2010 (4)	2920	176,71	16,52
28/05/2010 (5)	2440	176,71	13,81
28/05/2010 (6)	2550	176,71	14,43
28/05/2010 (7)	2440	176,71	13,81
31/05/2010 (1)	2460	176,71	13,92
31/05/2010 (2)	3360	176,71	19,01
31/05/2010 (3)	3380	176,71	19,13
31/05/2010 (4)	3120	176,71	17,66
31/05/2010 (5)	3110	176,71	17,60
31/05/2010 (6)	3540	176,71	20,03
31/05/2010 (7)	3130	176,71	17,71
01/06/2010 (1)	11100	176,71	62,81
01/06/2010 (2)	10500	176,71	59,42
01/06/2010 (3)	10240	176,71	57,95
01/06/2010 (4)	2830	176,71	16,01
01/06/2010 (5)	3010	176,71	17,03
01/06/2010 (6)	3260	176,71	18,45
01/06/2010 (7)	3030	176,71	17,15
04/06/2010 (1)	9190	176,71	52,01
04/06/2010 (2)	7430	176,71	42,05
04/06/2010 (3)	8330	176,71	47,14
04/06/2010 (4)	3140	176,71	17,77
04/06/2010 (5)	2730	176,71	15,45
04/06/2010 (6)	3010	176,71	17,03

## 6. CONCLUSIONES

Conclusiones de los resultados

## 6. CONCLUSIONES

A partir del análisis e interpretación de los resultados de los ensayos realizados con mezclas de hidróxido de cal, chamota, arena y agua que se han obtenido a raíz de un análisis basado en el comportamiento de la cal y de todos en su conjunto, y del que posteriormente se ha comprobado su comportamiento físico y mecánico, así como su composición mediante difracción de rayos X; se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Respecto a las dosificaciones, consideramos como dosificación óptima para un hormigón de cal y chamota una proporción de 1/1,7 ya que, siendo ensayada con diferentes gravas, arenas y varios tipos de dosificaciones, es la que siempre ha obtenido mayores resultados en los ensayos a compresión, en comparación con dosificaciones con menor cantidad de chamota; y confirmando que cuando se utilizan dosificaciones mayores, en cuanto a chamota, el resultado a ensayos de compresión no obtiene variaciones importantes, dándose el caso de poder disminuir la resistencia.
- La resistencia del compuesto con inclusión de chamota estudiado a diferencia del hormigón utilizado actualmente fabricado con cemento Portland, no ofrece el mismo grado de resistencia a compresión todo y sus valores aceptables; todo y así el fin de este compuesto no está pensado para sustituir el hormigón actual sino para pequeñas construcciones, las cuales no requieran que nuestro compuesto este sometido a grandes cargas estructurales.
- El análisis económico y medioambiental, favorece al hormigón con adición de chamota, dado que este esta formado por polvo de ladrillo el cual proviene de piezas cerámicas que no han tenido una cocción

adecuada; de ahí su bajo coste. Este punto también implica una diferencia mucho mayor cuando hablamos del medioambiente, ya que, a diferencia del cemento, por ejemplo, no necesita un proceso de fabricación y/o modificación de sus características para que actúe como es debido, sino que la chamota únicamente hay que convertirla en polvo.

Por otro lado el hormigón estudiado también se compone de cal, la cual también produce unas emisiones contaminantes a la atmósfera en su obtención y fabricación, de igual manera que se producen en el proceso de producción del cemento Portland, aun teniendo en cuenta las técnicas actualmente conocidas de sustitución de materias primas como combustibles a residuos industriales.

- El tratamiento de carbonatación acelerada al que se han sometido todas las probetas de hormigón endurecido nos ha permitido estudiar la evolución de las propiedades de este compuesto, con un índice de carbonatación del 100%. Este proceso de forma natural puede llegar a durar meses incluso años, dependiendo del grosor de la muestra y del tipo de cal utilizado. El control de masa periódico llevado a cabo con todas las probetas tratadas a permitido estudiar el comportamiento del hormigón de cal en lo que se refiere a la evolución de la carbonatación del mismo; se ha observado como en una atmósfera con un índice de CO<sub>2</sub> del 10% (en el aire que respiramos hay apenas un 0,03%), las probetas en sus primeras 72 horas aproximadamente de tratamiento no pierden prácticamente peso, que si aumenta ligeramente la pérdida pasado este momento. Este fenómeno es debido a la alta velocidad de combinación

del hidróxido de calcio con el anhídrido carbónico (carbonatación), y la ralentizada evaporación del agua que produce esta reacción.

También cabe decir que las probetas carbonatadas artificialmente al estar en una atmósfera con índice de CO<sub>2</sub> 300 veces superior a los niveles normales, se produce una rápida carbonatación del Ca(OH)<sub>2</sub>, obteniendo un hormigón endurecido a base de CaCO<sub>3</sub> y compuestos hidráulicos que no han tenido tiempo de combinarse con el agua, por lo tanto hablamos de una reacción, casi en su totalidad, aérea.

- Por el contrario de las probetas endurecidas en la cámara de carbonatación, están las que lo han hecho en ambiente laboratorio; la primera diferencia es la más que considerable pérdida de peso, ya que estando en ambiente exterior llegan a perder 600/650 gr en una semana cuando apenas pierden 15/20 gr estando en cámara de carbonatación, esto tiene relación directa con lo comentado en el punto anterior respecto a la velocidad de la reacción del hidróxido cálcico con el anhídrido carbónico, puesto que en estas pasa justo lo contrario ( esta reacción es muy lenta); cuando se ensayan a compresión y se las rocía con fenoftaleína, aparecen prácticamente en su totalidad sin carbonatar y el resultado del ensayo da una resistencia entre 4 y 5 veces menor.
- Mencion a parte, ya que fue una sorpresa para nosotros, para las probetas que han pasado desde unas horas después de su fabricación hasta momentos antes de su rotura sumergidas totalmente en agua. Estas dado que no iban a tener ningún contacto con CO<sub>2</sub> sabíamos de antemano que no iban a estar carbonatadas

prácticamente nada el día del ensayo a compresión, pero nunca imaginamos que obtendrían las mayores de las resistencias, superando incluso a las que han estado en la cámara de CO<sub>2</sub> durante el mismo tiempo (3 meses aproximadamente). Deducimos que este resultado se debe a que todo y no haber mantenido contacto con CO<sub>2</sub> (causante de la carbonatación y por tanto del endurecimiento aéreo), esto no ha permitido que el hidróxido de calcio y el anhídrido carbónico se combinen, en cambio si lo han hecho los silicatos y aluminatos. Estos, hidratados, cristalizan y los cristales se entrecruzan formando una red cada vez más rígida, debido al aporte de esta reacción a nuestras probetas, estas han sufrido un aumento progresivo de su resistencia a niveles mayores que cualquiera de las demás, dejando claro que estas probetas han dado resistencias mecánicas mayores en menor tiempo que las probetas con un fraguado y endurecimiento aéreo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Documentación de soporte

**7. BIBLIOGRAFÍA**

- Artes de la cal, Ignacio Gárate Rojas: Ministerio de Cultura, 1994.
- Hormigones y morteros, Manuel Bustillo Revuelta.
- ROSELL, Jaume; SUBIRATS, Miquel: La producció de calç, ahir. El procés pre-industrial de producció de calç, a la comarca del Montsià. Barcelona : Col.legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, 1987.
- CHOISY, Auguste: L'Art de bâtir chez les Romains (1873) [V. castellana, El arte de construir en Roma. Madrid : Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, CEDEX, 1999. Trad. de Manuel Manzano-Monís].
- ROSELL, Jaume; CÁRCAMO, Joaquín: Los orígenes del hormigón armado y su introducción en Bizkaia. La fábrica Ceres de Bilbao. Bilbao : Bizkaiko Aparailari eta Arkitekto Teknikoen Elkargo Ofiziala, 1996.
- Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona: <http://www.epseb.upc.edu/>
- Mario Collepardi – La produzione del calcestruzzo antico e moderno  
Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra, Università di Ancona
- M.Arandigoyen y J.I.Álvarez – Estructura porosa y proceso de carbonatación en pastas mixtas de cal con diferente porcentaje de cemento
- Recuperación de morteros romanos de cal y chamota en aplicaciones actuales. “ Departamento de construcción y tecnologías arquitectónicas”. Escuela técnica superior de arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid. Mariano Gonzales Cortina ( Tesis doctoral)

## Internet:

- [www.construmatica.com](http://www.construmatica.com)
- Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona: <http://www.epseb.upc.edu/>
- AENOR: <http://www.aenor.es/>
- Cales de Pachs S.A.. <http://www.calespachs.com>
- Oriol Roselló: [www.bangolo.com](http://www.bangolo.com)

**- Normas UNE AENOR: <http://www.aenor.es/>**

- UNE-EN 1015-10, AENOR (2000). “Método de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido”.
- UNE-EN 1015-11, AENOR (2000). “Método de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido”.
- 
- UNE-EN 459-1:2002. Cales para la construcción
- UNE-EN 206-1:2000 Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad
- UNE-EN 13055-1:2002 Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado
- UNE-EN 1097-6:2001 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.
- UNE EN-196-3 Métodos de ensayos de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.
- UNE-EN 13295 Resistencia a carbonatación
- UNE 83-313-90 i 83-304-84 Cono de Abrams
- UNE-EN 83-301 Preparación de probetas
- UNE-EN 12350-2:2006 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento
- EN 12390-4-2000 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión.
- UNE 83-303-84 Refrentado de probetas con mortero de azufre
- EHE.

## 8. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos

## **8. AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor: al Sr. **Joan Ramón Rosell**, profesor de esta escuela y director del PFC, por su labor como guía, y por su ayuda en la comprensión durante las diferentes situaciones y momentos con los que nos hemos encontrado durante este trabajo.

A la Dra. **Antonia Navarro**, profesora de esta escuela, por instruirnos en el campo de la geología, y por su orientación en la obtención e interpretación de los datos obtenidos en el proceso experimental. También agradecer su infinita paciencia, amabilidad, y haber estado dispuesta en todo momento a ayudarnos a lo largo de este trabajo.

Al Laboratorio de Materiales de la EPSEB por permitirnos disponer en todo momento de sus instalaciones, incluso en épocas festivas, para llevar a cabo toda la campaña experimental. También queremos expresar nuestro agradecimiento a todo el personal del Laboratorio, y en especial a **Roger y Alba** por su ayuda siempre que la hemos necesitado; y sobre todo por aguantarnos y animarnos día tras día.

Agradecer a CALES PACHS S.L. por el suministro de todos los sacos de cal necesarios para la elaboración del proyecto, de la misma manera también agradecer a SALT DEL MATXO S.L. por suministrarnos la chamota.

A Oriol Roselló, arquitecto y responsable de la sociedad Bangolo, por el aporte de documentación técnica y gráfica, y por su grado de implicación con nuestro proyecto en todo lo que le fue posible aun sabiendo finalmente que no íbamos a poder realizar la puesta en obra, tal y como estaba planeado inicialmente.

Por supuesto, agradecer a tod@s nuestro@s amig@s su comprensión por el poco tiempo que les hemos dedicado durante los 9 meses que ha durado el proyecto, especialmente estos dos últimos meses de recta final; pero sobre todo por la motivación que han aportado a este equipo en todo momento.

Agradecer también a Alberto Moreno, Ivan Alcón, Aleix Jove y Mohamed Agana, compañeros inseparables desde el inicio hasta el final de la carrera, por su apoyo y ayuda en todo tipo de momentos y situaciones, no tan solo académicas y profesionales, sino también personales. Esperando que esto no sea el fin de nuestras relaciones, sino un inicio de un futuro prometedor en este mundo.

Y por último aunque no por ello menos importante, expresar nuestro agradecimiento a nuestros familiares, en especial:

*(JOAN):* A mis padres, **Joan y Joana**, a mis hermanas **Montse y Laura**, y a mi novia **Verónica**, por su comprensión y paciencia al no haberles dedicado más tiempo del que habría deseado durante esta última fase de la carrera.

*(XAVI):* A mis padres, **Jose y Encarna**, mi abuela **Carmen**, mi hermano **Juan** y su mujer **Encarna**, a mis sobrinos **Marc y Alex**, y a mi novia **Mireia** por ayudarme y motivarme a lo largo de toda la carrera y, en especial, por comprender el poco tiempo que les he dedicado estos últimos 9 meses.



## 9. ANEJOS

Datos complementarios

**ÍNDICE DE ANEJOS**

1. MATERIALES .....	64
1.1 Cal .....	66
1.2 Áridos y chamota .....	67
2. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	70
2.1 Dosificación pasta cal/chamota.....	72
2.2 Dosificación probetas cúbicas 70x70x70mm .....	77
2.2.1 Rotura de probetas cúbicas con tratamiento de CO <sub>2</sub> (10%).....	80
2.2.2 Rotura de probetas cúbicas expuestas al ambiente de laboratorio (40-50% HR y 25-30°C).....	81
2.3 Realización primeras probetas cilíndricas .....	82
2.4 Procedimiento de las probetas cilíndricas y ensayos utilizados.....	90
3. ENSAYOS .....	94
3.1 Ensayos de porosidad y densidad.....	96
3.2 Determinación de absorción por capilaridad .....	96
3.3 Determinación de desorción por capilaridad .....	98
3.4 Difracción de rayos X (DRX) .....	100
3.5 Determinación de resistencia a compresión .....	101

## 1. MATERIALES

Cal

Áridos y chamota

1.1 Cal

Ficha de especificaciones del producto



GALES DE PACHS, S.A.  
 Montaña San Jaime, s/n (afueras)  
 Tel. 93 890 30 11 - 93 890 32 89  
 Fax 93 890 36 89  
 e-mail: pachs@calespachs.com  
 www.calespachs.com  
 08796 Pals del Penedès (Barcelona)



**HIDROXIDO CALCICO CL 90-S**  
 Ficha técnica de producto

IDENTIFICACIÓN			
Nombre Químico:	HIDRÓXIDO CALCICO	Fórmula Química:	Ca(OH) <sub>2</sub>
Nº de registro CAS:	1305 – 62 – 0	Estado Físico:	Polvo fino.
(Chemical Abstract Service Registry Number)		Peso Molecular:	74,08
Nº EINECS:	215 – 137 – 3	Nombre Común:	Cal apagada
(European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances)		Denominación Normalizada:	CL 90-S
		Fabricado en:	Pals del Penedès (Barcelona)

**CONSTITUYENTES**  
 Sustancia de un solo componente, HIDROXIDO DE CALCIO, con pequeños porcentajes de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO y CO<sub>3</sub>Ca, procedentes de la materia prima caliza de carácter natural.  
 Producto natural obtenido por mezcla de óxido de calcio y agua.

PROPIEDADES GENERICAS			
Aspecto:	Polvo blanco inodoro.		
pH:	12,4 en solución saturada a 25°C		
Tº descomposición:	580 °C formando óxido de calcio y agua.		
Peso específico:	2,20 Kgs/l a 20 °C		
Solubilidad:	Soluble en ácidos, glicerina y soluciones de sacarosa.		
	Ligeramente soluble en agua:	A	0 °C 1,85 Kg/m <sup>3</sup>
		A	20 °C 1,65 Kg/m <sup>3</sup>
		A	100°C 0,71 Kg/m <sup>3</sup>
Reactividad:	Reacción exotérmica con ácidos para formar sales de calcio.		

**PRESENTACIÓN Y SUMINISTRO**  
 Sacos: De válvula. 2 hojas de papel Clupak (exterior blanca) de ≈ 20 kgs.

**APLICACIONES**  
 Producto utilizado en: agricultura y ganadería, industria y medio ambiente para ajuste de pH y dureza de aguas, remineralización, eliminación de metales pesados, tratamiento de fangos de depuradoras (EDAR) y en general para aguas de consumo, aguas industriales o residuales. En incineradoras RSU y centrales térmicas para tratamiento de gases.  
 La cal se usa como: neutralizante, fundente, caustificante, lubricante, secante, cementante, absorbente, precipitante, desinfectante, impermeabilizante y por supuesto como materia prima.

**NORMATIVA**  
 UNE-EN 459 – Partes 1,2 y 3 "Cales para la construcción".  
 UNE-EN 12518 "Productos químicos utilizados en el tratamiento del agua destinada al consumo humano – Cal".

CARACTERISTICAS QUIMICAS		
	Valor medio	Desviación
o CaO + MgO	91,50%	±1,10
o CO <sub>2</sub>	1,40%	±0,13
o Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20%	±0,05
o Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,60%	±0,05
o SiO <sub>2</sub>	0,80%	±0,15
o H <sub>2</sub> O humedad	1,20%	±0,36
o Ca(OH) <sub>2</sub> util	89,50%	±1,50

CARACTERISTICAS FISICAS		
	Valor medio	Desviación
GRANULOMETRIA:		
o Retenido a 200 µ	0,00 %	±0,01
o Retenido a 90 µ	0,02 %	±0,01
DENSIDAD APARENTE:	380 gr/l.	10 gr/l

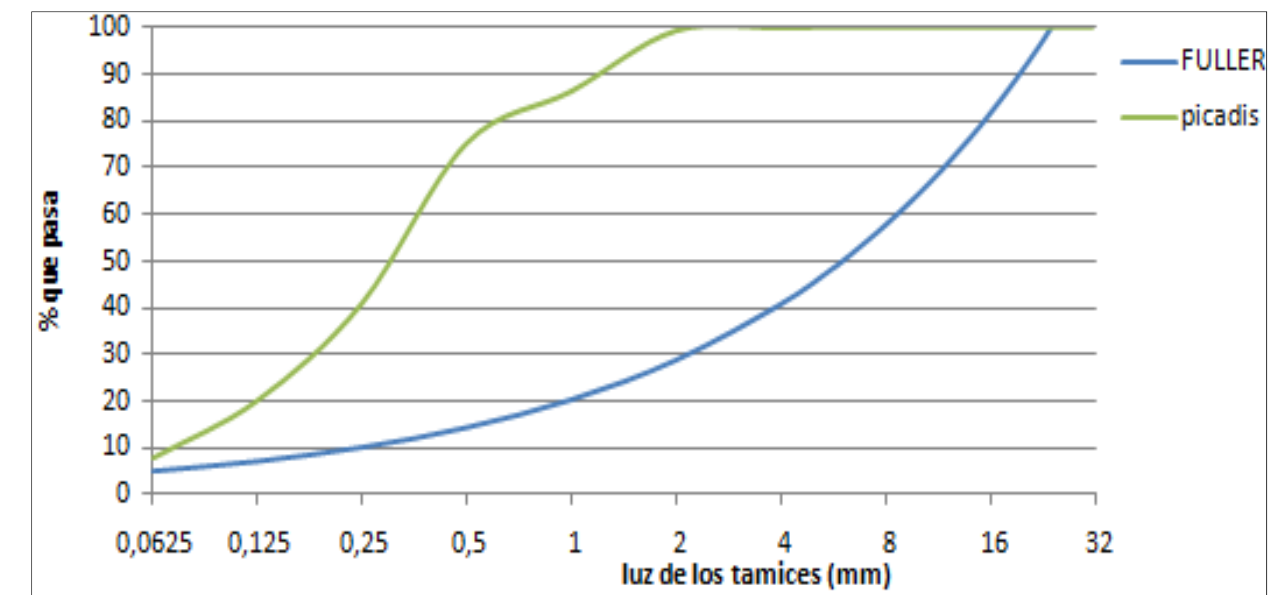
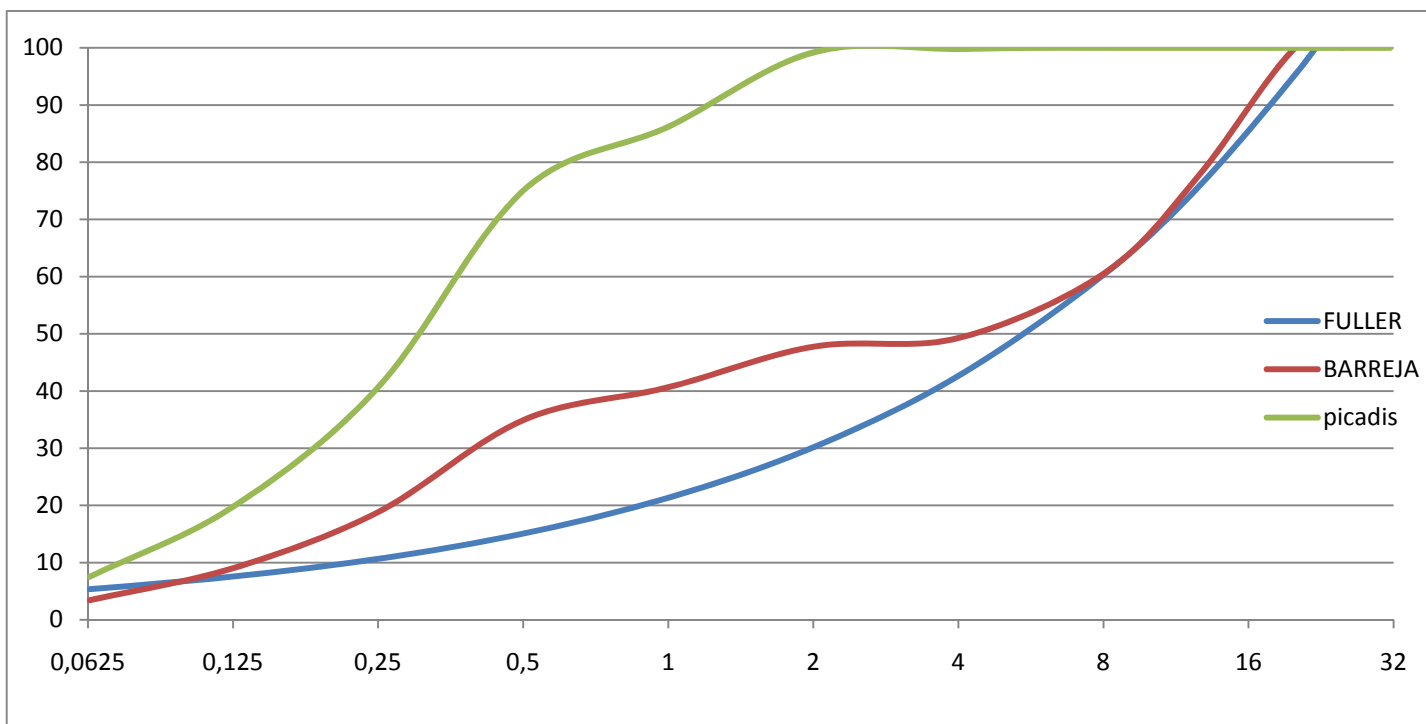
DESIGNACIÓN	NOTACIÓN	CaO+MgO % en masa	MgO % en masa	CO <sub>2</sub> % en masa	SO <sub>3</sub> % en masa	Cal libre % en masa
Cal Cállica 90	CL 90	≥90	≤ 5 (2)	≤ 4	≤ 2	-
Cal Cállica 80	CL 80	≥80	≤ 5 (2)	≤ 7	≤ 2	-
Cal Cállica 70	CL 70	≥70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	-
Cales dolomíticas 85	DL 85	≥85	≥30	≤ 7	≤ 2	-
Cales Dolomíticas 80	DL 80	≥80	≥5	≤ 7	≤ 2	-
Cal hidráulica 2	HL 2	-	-	-	≤ 3 (1)	≥ 8
Cal Hidráulica 3,5	HL 3,5	-	-	-	≤ 3 (1)	≥ 6
Cal hidráulica 5	HL 5	-	-	-	≤ 3 (1)	≥ 3
Cal Hidráulica natural 2	NHL 2	-	-	-	≤ 3 (1)	≥ 15
Cal hidráulica natural 3,5	NHL 3,5	-	-	-	≤ 3 (1)	≥ 9
Cal hidráulica natural 5	NHL 5	-	-	-	≤ 3 (1)	≥ 3

(1) Un contenido de SO<sub>3</sub> superior al 3% e inferior al 7% es admisible, a condición de que la estabilidad sea confirmada después de 28 días de conservación en agua, según el ensayo dado en la Norma Europea EN196-2.  
 (2) Un contenido de MgO hasta el 7% es admisible a condición de que la estabilidad sea confirmada según el ensayo dado de la Norma Europea EN459-2:2001.

1.2 Áridos y chamota

% que pasa						
	Grava D	Grava E	Arena B	Grava C	Grava F	Arena A
Diámetro	11/22	6/12	0/5	8/22	4/10	0/5
25	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100
12,5	9	100	100	100	100	100
8	0	42	100	68	100	100
4	0	1	82	1	64	90
2	0	1	57	1	14	60
1	0	0	37	0	1	34
0,5	0	0	23	0	0	19
0,25	0	0	11	0	0	8
0,125	0	0	3	0	0	1
0,063	0	0	1	0	0	0
Finos	0	0	0	0	0	0

CHAMOTA			
Peso retenido	Peso acumulado	% que pasa	Tamiz
0	0	100	25
0	0	100	20
0	0	100	12,5
0	0	100	8
0,9	0,9	100	4
2,5	3,4	99	2
56,87	60,27	86	1
48,89	109,16	75	0,5
150,43	259,59	41	0,25
91,31	350,9	20	0,125
53,56	404,46	8	0,063
32,93	437,39	0	-
437,39	-	-	-





## 2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Dosificación pasta cal/chamota

Dosificación probetas cúbicas 70x70x70mm

Realización primeras probetas cilíndricas

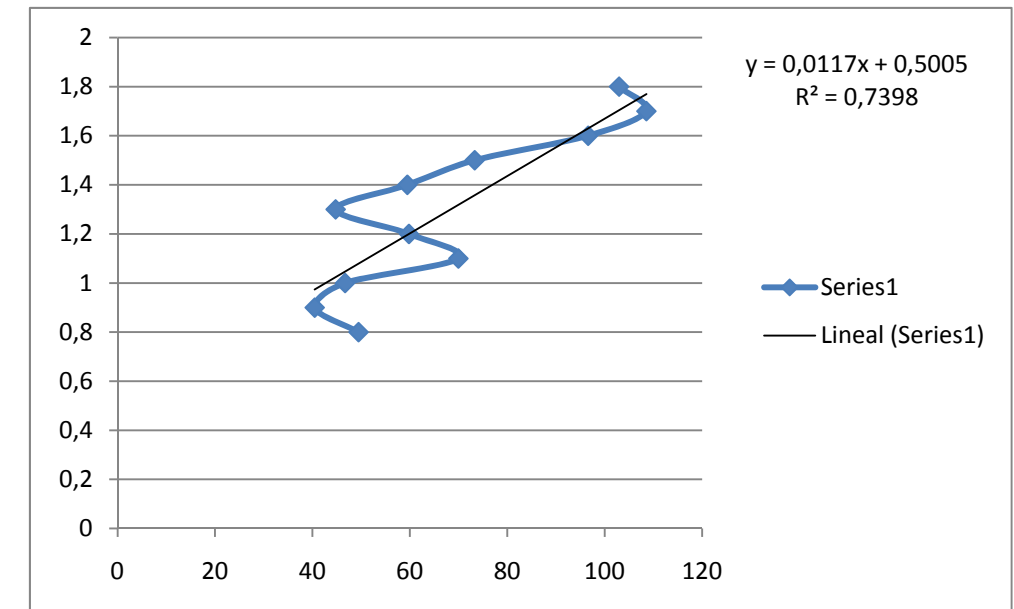
Procedimiento de las probetas cilíndricas y ensayos utilizados

2.1 Dosificación pasta cal/chamota

TABLA DE DOSIFICACIONES CAL/CHAMOTA/AGUA+ENSAYO VICAT CON SONDA TETMAYER RESPECTO UNE-EN 196-3						
DOSIFICACIONES	CAL (gr)	CHAMOTA(gr)	AGUA (gr)	AGUA (%)**	RESULTADO TETMAYER (mm)	PESO (gr)
1/0,8	277,77	222,23	276,7	1,00	31	-
			280,4	1,01	18	-
			282	1,02	5,5	65,1
1/0,9	263,15	236,84	280	1,06	20	-
			281,6	1,07	13	-
			282,8	1,07	6,5	64,9
1/1,0	250	250	280	1,12	2	-
			270	1,08	12	-
			271,1	1,08	9	65,9
1/1,1	238,09	261,9	260	1,09	20	-
			262	1,10	17	-
			264	1,11	5	65,2
1/1,2	227,27	272,72	255,1	1,12	5	66,3
1/1,3	217,39	282,6	250	1,15	3	-
			245	1,13	4	69,3
1/1,4	208,33	291,66	235	1,13	14	-
			237	1,14	7	67,6
1/1,5	200	300	225	1,13	17	-
			227	1,14	6	68,4
1/1,6	192,3	307,7	218	1,13	19	-
			221	1,15	5	72,8
1/1,7	185,18	314,82	212	1,14	21	-
			215	1,16	4	73,5
1/1,8	178,57	321,43	210	1,18	20	-
			212	1,19	7	73,8

TABLA DE ROTURAS A COMPRESIÓN PASTA CAL/CHAMOTA			
DOSIFICACIONES	SUP. (cm2)	CARGA(kg)	σ (kg/cm2)
1/0,8	10,694	529	49,5
1/0,9	10,555	427	40,5
1/1,0	10,578	494	46,7
1/1,1	10,578	740	69,9
1/1,2	9,898	592	59,8
1/1,3	10,636	476	44,7
1/1,4	10,406	619	59,5
1/1,5	10,694	784	73,3
1/1,6	10,694	1033	96,6
1/1,7	10,694	1161	108,6
1/1,8	10,636	1095	102,9

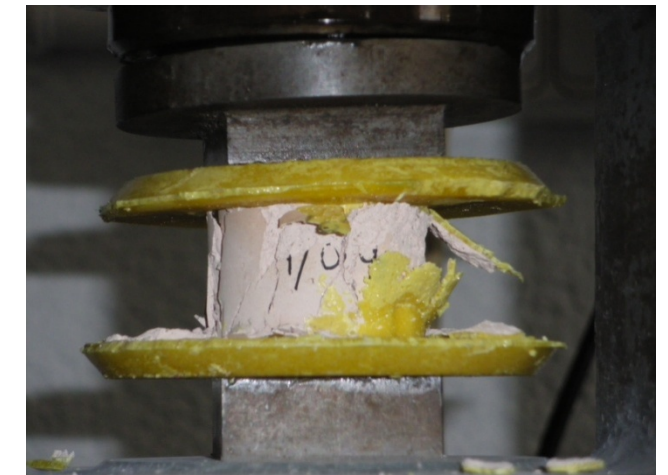
■ 13 días ambiente laboratorio + 10 días cámara CO2  
■ 7 días ambiente laboratorio + 10 días cámara CO2



\* La tabla realizada contiene las diferentes dosificaciones de cal y chamota para conseguir una consistencia normal, respecto a un total de 500 gr para cada dosificación.

\*\* % del peso del agua respecto al peso de la cal.





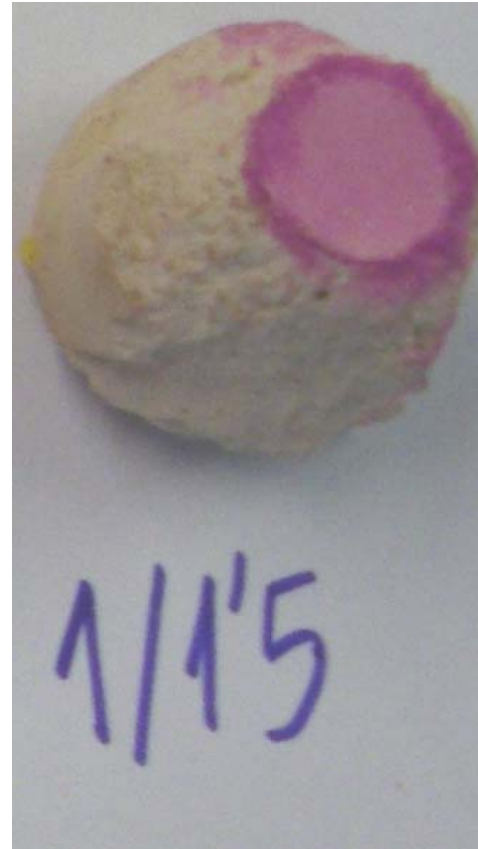
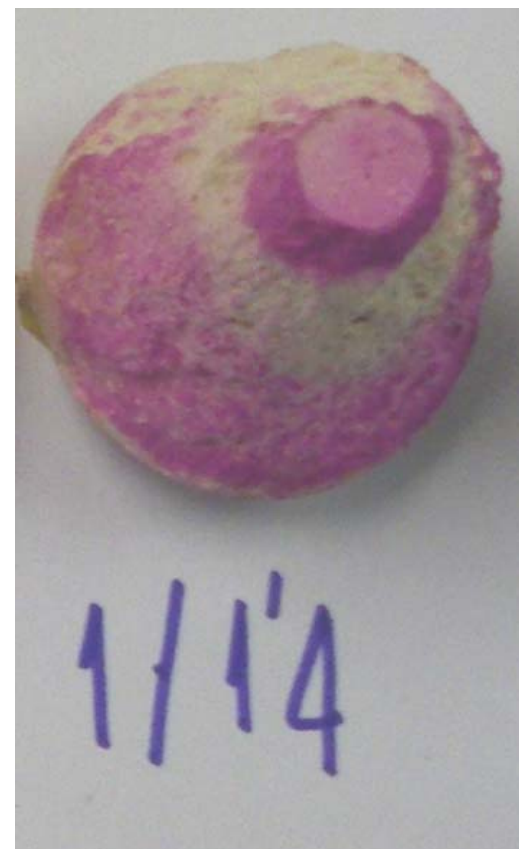
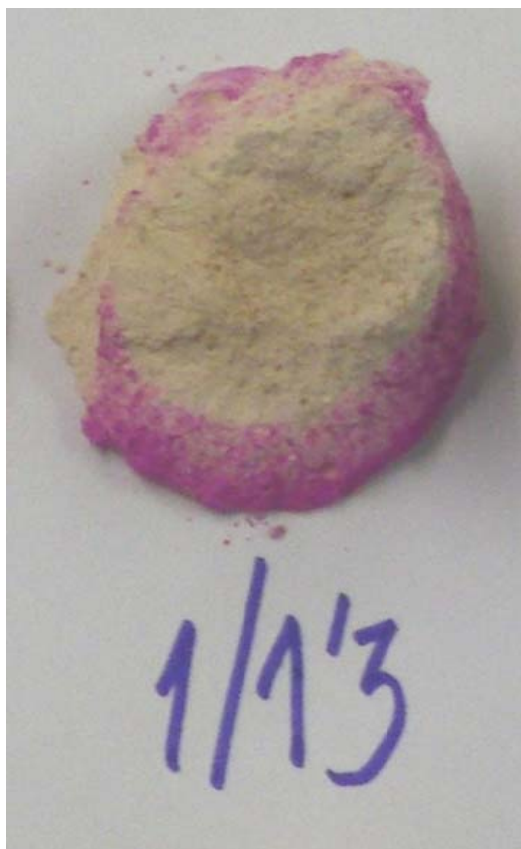
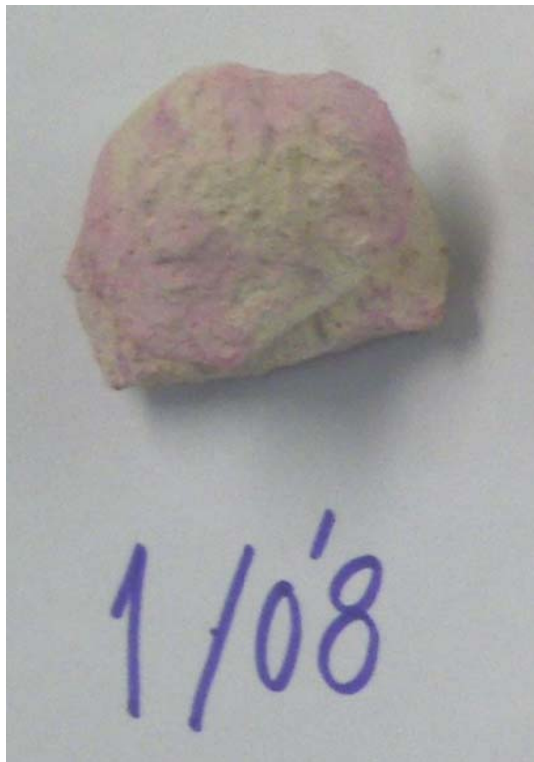


TABLA DE PESOS DE LAS PROBETAS DE PASTA CAL/CHAMOTA														
carbonatación	27-abr	28-abr	29-abr	30-abr	03-may	04-may	05-may	06-may	07-may	10-may	11-may	12-may	14-may	18-may
pesos	ciclo 0	ciclo 1	ciclo 2	ciclo 3	ciclo 4	ciclo 5	ciclo 6	ciclo 7						
1/0,8	42,9	48,83	48,35	48,26	48,16	48,17	48,15	48,15						
1/0,9	42,53	48,08	47,62	47,51	47,39	47,17*	47,15	47,15						
1/0,10	44,23	49,93	49,39	49,28	49,15	49,17	49,16	49,17						
1/1,1	43,37	48,89	48,41	48,29	48,18	48,19	48,19	48,19						
1/1,2	43,57	48,62	48,18	48,06	47,96	47,97	47,94	47,96						
1/1,3	47,06	52,23	51,72	51,56	51,45	51,47	51,46	51,46						
1/1,4	46,41	51,18	50,74	50,59	50,49	50,5	50,5	50,5						
1/1,5	48,13	53,16	52,6	52,43	52,31	52,33	52,32	52,32						
1/1,6	49,65	53,58	52,6	52,32	52,19	52,21	52,19	52,21						
1/1,7	50,28	54,03	53,08	52,8	52,67	52,69	52,67	52,67						
1/1,8	50,79	54,22	53,2	52,9	52,8	52,82	52,8	52,8						
1/0,8	-	-	57,65	44,38	41,9	42,08	42,23	42,4	42,57	42,96	43,07			
1/1,0	-	-	59,32	45,89	43,17	43,34	43,47	43,63	43,86	44,24	44,33			
1/1,3	-	-	61,16	47,31	45,86	46	46,11	46,26	46,51	46,82	46,92			
1/1,4	-	-	61,56	48,14	46,75	46,9	47,04	47,17	47,39	47,71	47,79			
1/1,5	-	-	63,49	50,72	49,21	49,38	49,38	49,51	49,69	50	50,08			
1/1,8	-	-	63,46	51,21	50,53	50,66	50,76	50,89	51,04	51,35	51,42			
1/1,8	84,48	76,75	76,07	76,23	76,66	76,81	76,94	77,09	77,37	77,61	77,65			
1/1,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	162,92	145,49	145,78
1/2,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	163,51	143,45	143,6
1/2,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	168,39	149,27	149,43

Probetas en ambiente de laboratorio  
 Probetas sometidas a carbonatación acelerada

Serie 1	Pes hidro.	Pes sat.	Pes sec	Dens. apar.	Dens. rel.	Porositat
0,8	5,74	10,44	7,39	1,29	2,75	53,1
0,9	10,91	19,85	14,13	1,30	2,72	52,4
1	6,34	11,45	8,23	1,30	2,64	50,8
1,1	11,5	21,3	15,37	1,34	2,76	51,6
1,2	10,17	18,62	13,33	1,31	2,73	52,0
1,3	5,22	9,61	6,97	1,34	2,70	50,6
1,4	12,55	23,5	17,18	1,37	2,76	50,4
1,5	24,4	45,84	33,88	1,39	2,72	49,0
1,6	24,3	45,63	33,83	1,39	2,71	48,6
1,7	23,17	43,88	32,52	1,40	2,75	49,0
1,8	21,37	40	29,62	1,39	2,70	48,6

Serie 3	Pes hidro.	Pes sat.	Pes sec	Dens. apar.	Dens. rel.	Porositat
0,8	12,21	20,22	13,03	1,07	2,60	58,9
0,9	4,86	8,13	5,26	1,08	2,64	59,1
1	5,59	9,41	6,14	1,10	2,65	58,5
1,1	4,03	6,84	4,47	1,11	2,69	58,8
1,2	7,83	13,33	8,78	1,12	2,68	58,1
1,3	5,06	8,72	5,81	1,15	2,70	57,5
1,4	5,06	8,83	5,92	1,17	2,75	57,5
1,5	4,01	7,08	4,81	1,20	2,76	56,6
1,6	12,7	22,25	15,21	1,20	2,69	55,4
1,7	11,98	20,94	14,4	1,20	2,65	54,6
1,8	4,58	8,26	5,68	1,24	2,84	56,3

Serie 2	Pes hidro.	Pes sat.	Pes sec	Dens. apar.	Dens. rel.	Porositat
0,8	5,54	9,4	6,14	1,11	2,69	58,8
1	6,37	10,12	6,9	1,08	2,19	50,5
1,3	2,07	3,71	2,57	1,24	2,76	55,1
1,4	6,62	11,83	8,14	1,23	2,78	55,7
1,5	7,87	13,99	9,79	1,24	2,67	53,4
1,8	6,45	11,7	8,32	1,29	2,71	52,4

Serie 1	15 días ambiente laboratorio + 10 días CO2
Serie 2	28 días ambiente laboratorio
Serie 3	fraguado hidráulico (bolsa)

2.2 Dosificación probetas cúbicas 70x70x70mm

TABLA DOSIFICACIONES PROBETAS CÚBICAS DE 70X70X70mm						
Dosificación	Chamota	Cal	Arena	Grava 6/12	Grava 11/22	Agua
1/1,3	180gr	138,5gr	45gr	150gr	125gr	156,50gr (1,13)
Porcentaje	36%	-	9%	30%	25%	

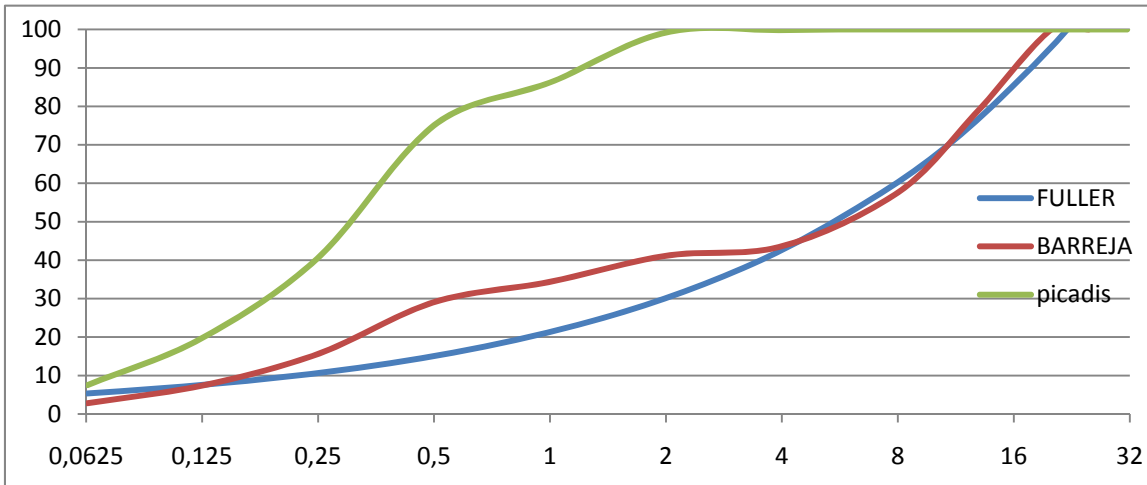


TABLA DOSIFICACIONES PROBETAS CÚBICAS DE 70X70X70mm						
Dosificación	Chamota	Cal	Arena	Grava 6/12	Grava 11/22	Agua
1/1,4	195gr	139,3gr	30gr	150gr	125gr	158,80gr (1,14)
Porcentaje	39%	-	6%	30%	25%	

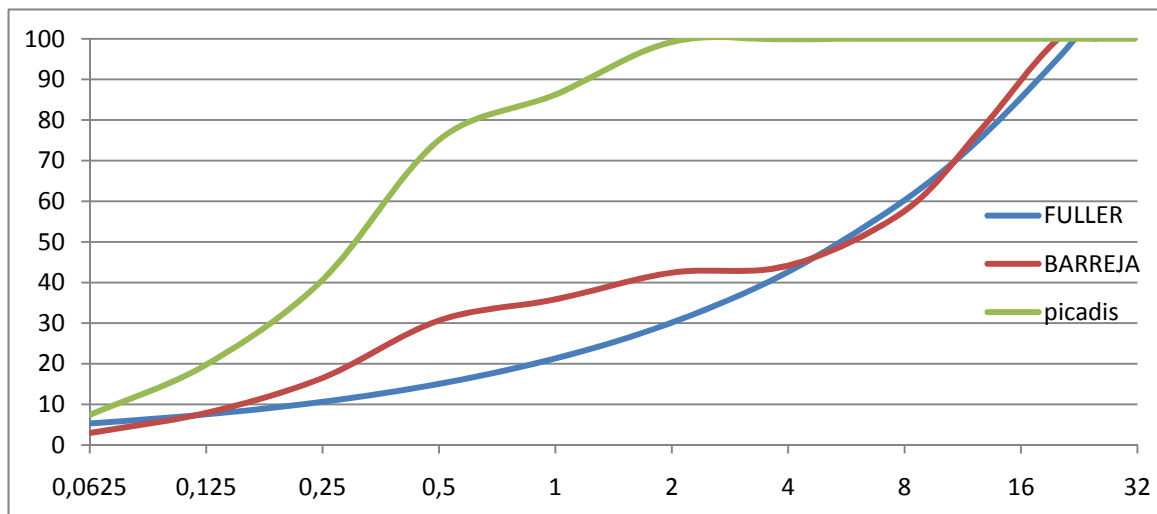


TABLA DOSIFICACIONES PROBETAS CÚBICAS DE 70X70X70mm						
Dosificación	Chamota	Cal	Arena	Grava 6/12	Grava 11/22	Agua
1/1,5	210gr	140gr	15gr	150gr	125gr	159,60gr (1,14)
Porcentaje	39%	-	6%	30%	25%	

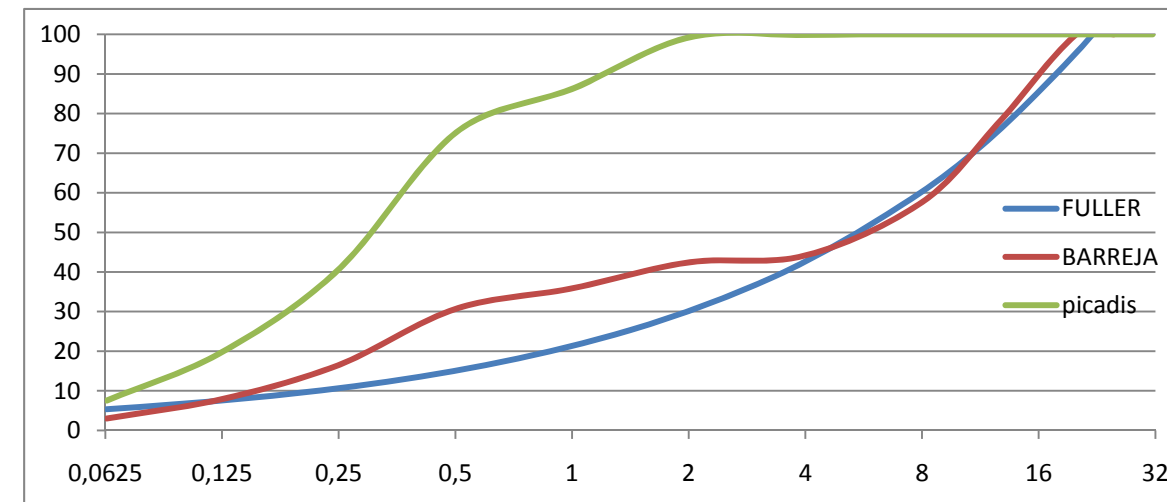


TABLA DOSIFICACIONES PROBETAS CÚBICAS DE 70X70X70mm						
Dosificación	Chamota	Cal	Arena	Grava 6/12	Grava 11/22	Agua
1/1,6	225gr	140,6gr	25gr	125gr	125gr	161,69gr (1,15)
Porcentaje	45%	-	5%	25%	25%	

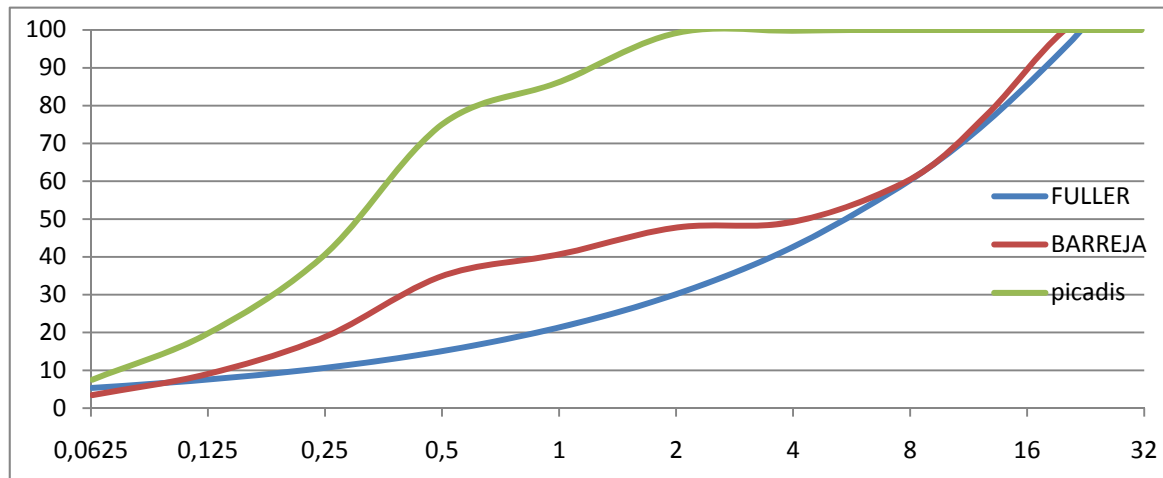


TABLA DOSIFICACIONES PROBETAS CÚBICAS DE 70X70X70mm						
Dosificación	Chamota	Cal	Arena	Grava 6/12	Grava 11/22	Agua
1/1,8	250gr	138,9gr	50gr	75gr	125gr	165,3gr (1,19)
Porcentaje	50%	-	10%	15%	25%	

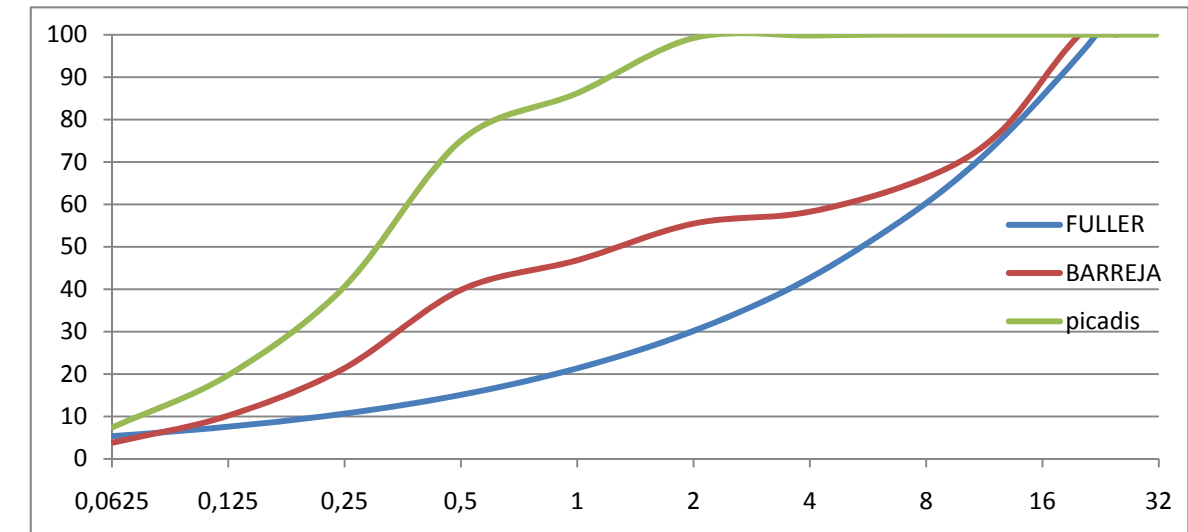
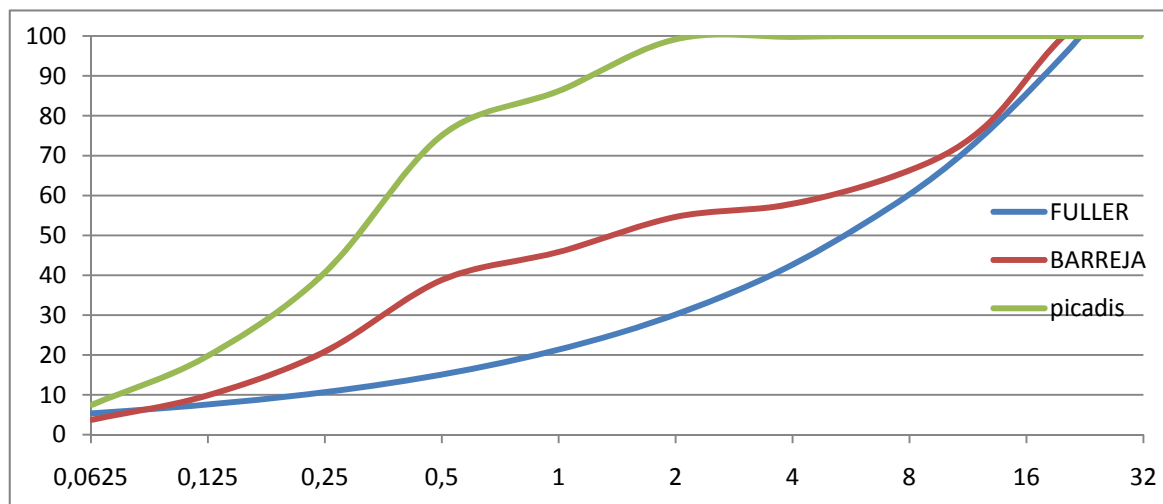


TABLA DOSIFICACIONES PROBETAS CÚBICAS DE 70X70X70mm						
Dosificación	Chamota	Cal	Arena	Grava 6/12	Grava 11/22	Agua
1/1,7	240gr	141,2gr	60gr	75gr	125gr	163,8gr (1,16)
Porcentaje	48%	-	12%	15%	25%	



COMPOSICIÓN DE PROBETAS CÚBICAS 70X70x70mm						
Dosificación	Chamota gr	Arena (0-5) gr	Grava (6-12) gr	Grava (11-22) gr	Cal gr	Agua/cal
1/1,3	180	45	150	125	138,5	1,13
1/1,4	195	30	150	125	139,3	1,14
1/1,5	210	15	150	125	140	1,14
1/1,6	225	25	125	125	140,6	1,15
1/1,7	240	60	75	125	141,2	1,16
1/1,8	250	50	75	125	138,9	1,19

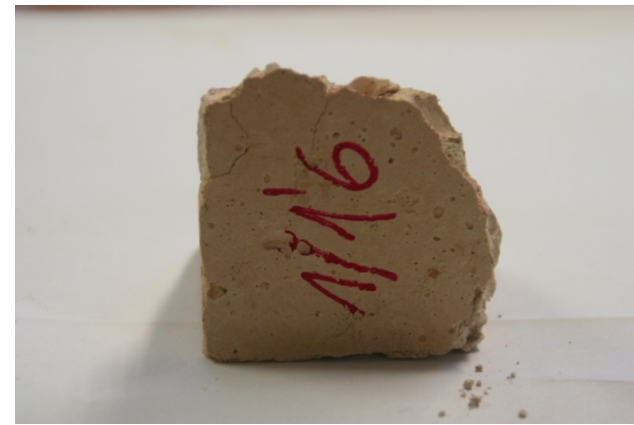
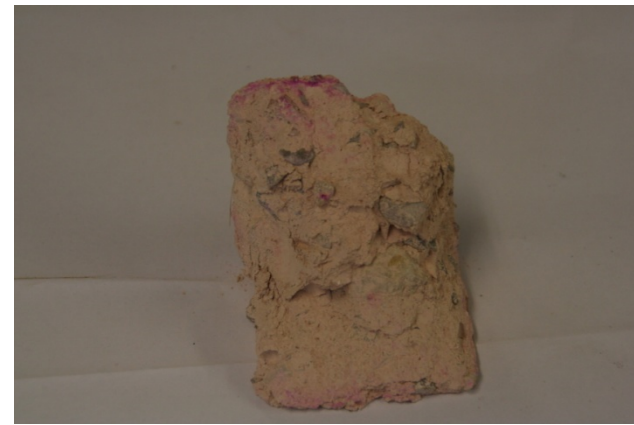
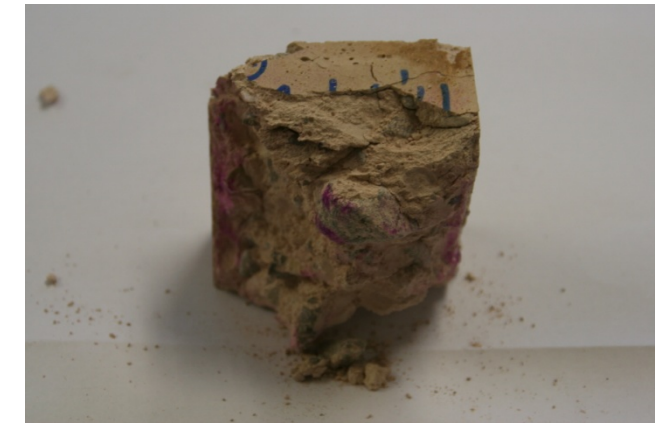
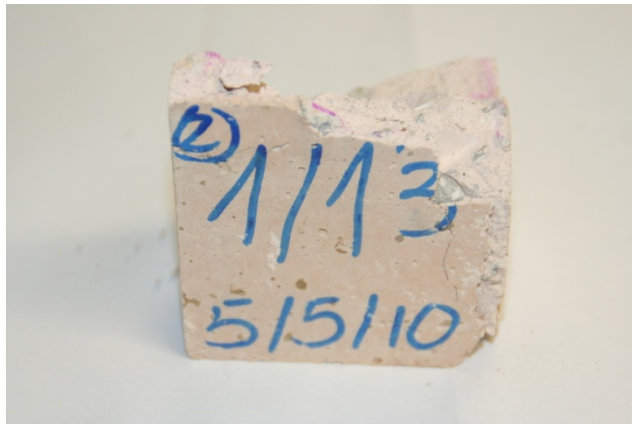
TABLA ROTURAS A COMPRESIÓN PROBETAS CÚBICAS			
Dosificación	SUP. (cm2)	CARGA(kg)	$\sigma$ (kg/cm2)
1/1,3	50	927	18,54
1/1,4	50	978	19,56
1/1,5	50	1285	25,7
1/1,6	50	1371	27,42
1/1,7	50	1559	31,18
1/1,8	50	1424	28,48
1/1,3 (2)	50	2006	40,12
1/1,4 (2)	50	2153	43,06
1/1,5 (2)	50	2735	54,7
1/1,6 (2)	50	2932	58,64
1/1,7 (2)	50	3071	61,42
1/1,8 (2)	50	2873	57,46

 Ambiente laboratorio

PROBETAS CÚBICAS 70x70mm												KG A COMPRESIÓN	KG A COMPRESIÓN
Dosificación	04/05/2010 gr	05/05/2010 gr	06/05/2010 gr	07/05/2010 gr	10/05/2010 gr	11/05/2010 gr	12/05/2010 gr	14/05/2010 gr	18/05/2010 gr	08/06/2010 gr	31/08/2010 gr	08/06/2010 Kg	31/08/2010 Kg
1/1,3	647,57	607,91	581,36	572,33	565,63	564,68	564,12	564,05	564,56	568,45	581,17	-	927
1/1,4	646,17	608,1	579,69	573,14	567,3	566,06	565,31	565,09	565,56	569,16	581,16	-	978
1/1,5	647,79	610,81	581,06	571,77	564,87	563,56	562,77	562,64	562,86	565,92	576,83	-	1285
1/1,6	-	642,4	599,81	575,14	561,08	559,7	558,77	558,52	558,8	562,4	574,66	-	1371
1/1,7	-	634,45	592,3	569,75	553,95	551,91	550,51	549,8	549,94	553,55	565,65	-	1559
1/1,8	-	634,95	591,38	567,51	551,98	550,25	549,11	548,71	548,88	552,12	564,85	-	1424
1/1,3 (2)	-	-	651,54	617,89	572,7	569,95	568,22	-	-	588,11	-	2006	-
1/1,4 (2)	-	-	668,7	638,03	591,6	588,4	586,36	-	-	603,81	-	2153	-
1/1,5 (2)	-	-	674,66	639,04	586,32	583,04	580,95	-	-	607,87	-	2735	-
1/1,6 (2)	-	-	646,36	617,14	569,57	566,39	564,4	-	-	589,26	-	2932	-
1/1,7 (2)	-	-	651,36	622,87	570,34	566,49	564,05	-	-	588,13	-	3071	-
1/1,8 (2)	-	-	678,05	646,77	589,03	584,04	581,05	-	-	603,79	-	2873	-

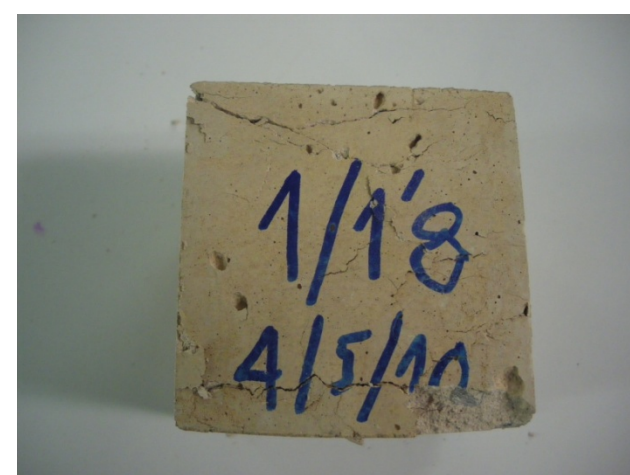
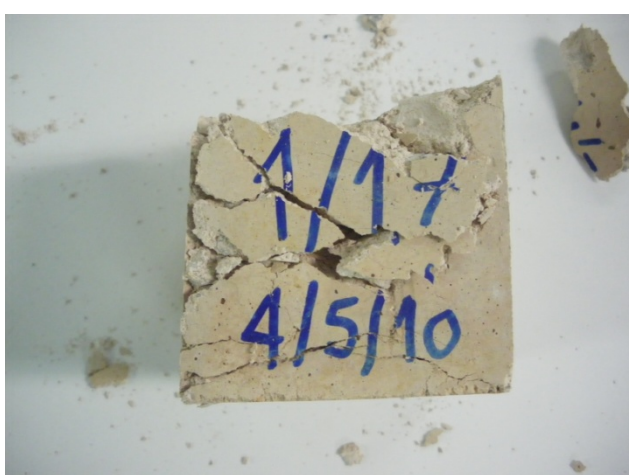
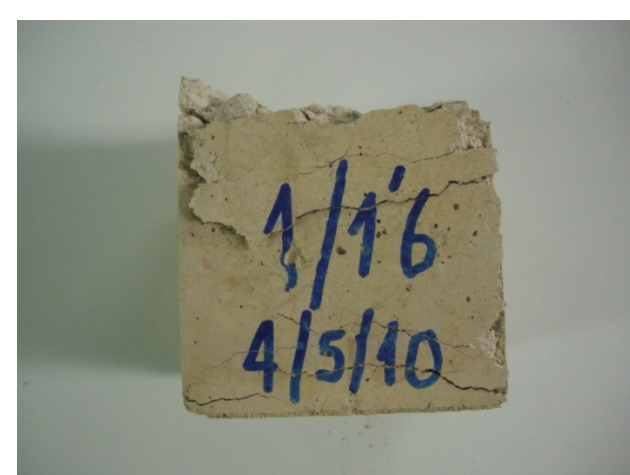
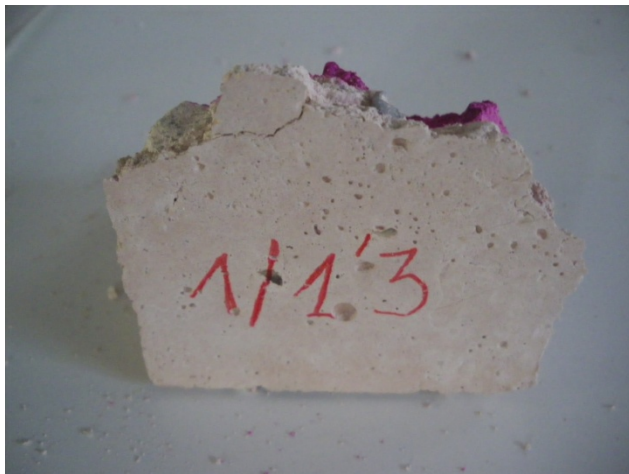
 Con tratamiento en cámara de CO2

2.2.1 Rotura de probetas cúbicas con tratamiento de CO<sub>2</sub> (10%)





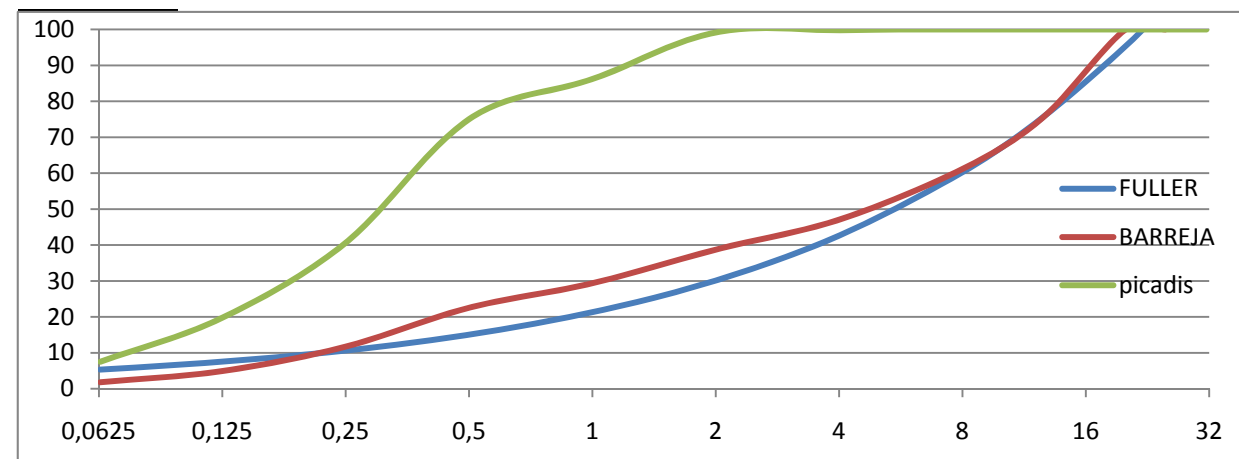
2.2.2 Rotura de probetas cúbicas expuestas al ambiente de laboratorio (40-50% HR y 25-30°C)



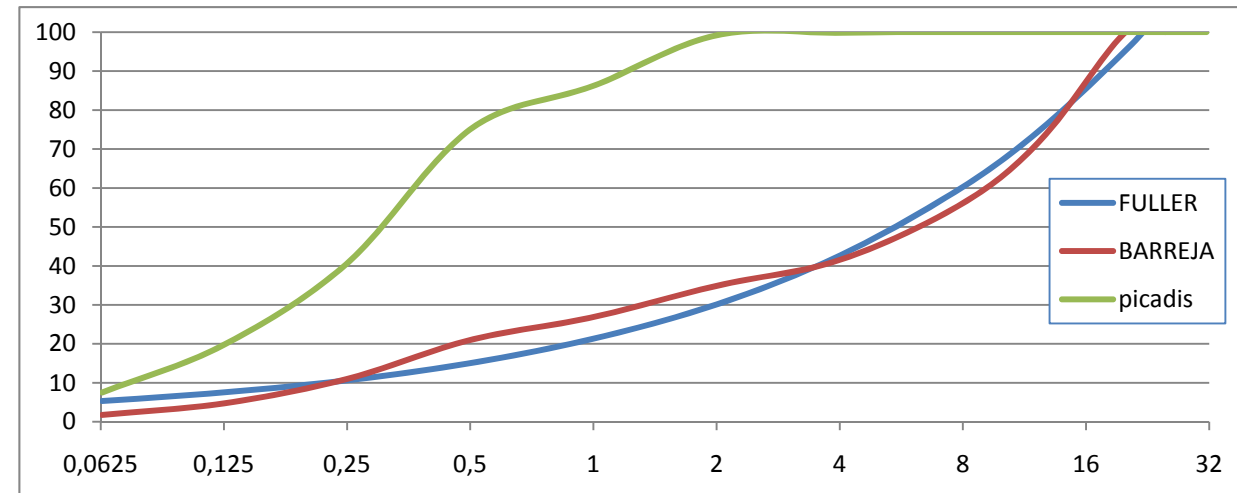
2.3 Primeras probetas cilíndricas

TABLA DE RELACIÓN DE COMPONENTES DEL HORMIGÓN DE CAL								
DOSIFICACIÓN	CAL/CHAMOTA	AGUA/CAL	RELACIÓN DE ÁRIDOS			CONO DE ABRAMS (respecto 30cm)	Nº PROBETAS	FECHA
			Arena (0-5)	Grava pequeña (6-12)	Grava grande (11-22)			
DOSIFICACIÓN I	1,08 (1/0,93)	1,29 ( 1/0,77)	32,80%	20,00%	27,20%	baja 12,5=17,5cm	3	22/02/2010
DOSIFICACIÓN II	1 (1/1)	1,5 ( 1/0,66)	26,00%	24,00%	30,00%	baja 19=11cm	1	24/02/2010
DOSIFICACIÓN III	1 (1/1)	1,4 (1/0,71)	26,00%	24,00%	30,00%	baja 14=16cm	1	03/03/2010
DOSIFICACIÓN IV	1 (1/1)	1,35 (1/0,74)	26,00%	24,00%	30,00%	baja 13,5=16,5cm	1	03/03/2010
DOSIFICACIÓN V	1 (1/1)	1,35 (1/0,74)	18,00%	19,00%	38,00%	baja 13=17cm	1	17/03/2010
DOSIFICACIÓN VI	1 (1/1)	1,36 (1/0,73)	18,00%	19,00%	38,00%	baja 13,3=16,7cm	1	17/03/2010
DOSIFICACIÓN VIIa	0,67 (1/1,5)	1,47 (1/0,68)	15,00%	30,00%	25,00%	baja 12=18cm	1	23/03/2010
DOSIFICACIÓN VIIb	0,67 (1/1,5)	1,41 (1/0,71)	15,00%	30,00%	25,00%	baja 8,3=21,7cm	1	23/03/2010
DOSIFICACIÓN VIIIa	0,67 (1/1,5)	1,41 (1/0,71)	3,00%	30,00%	25,00%	baja 14,5=15,5cm	1	24/03/2010
DOSIFICACIÓN VIIIb	0,67 (1/1,5)	1,36 (1/0,73)	3,00%	30,00%	25,00%	baja 9,9=20,1cm	1	26/03/2010
DOSIFICACIÓN XIX	0,58 (1/1,7)	1,31 (1/0,76)	5,00%	25,00%	25,00%	baja 7= 23cm	1	07/05/2010

Dosificación I - 22/02/10				
Grava 11/22	13,6	27,20%	40 kg	cono de abrams respecto 30, baja 12,5=17,5cm
Grava 6/12	10	20,00%		
Arena 0/5	16,4	32,80%		
Chamota	10	20,00%		
<b>Total</b>	<b>50</b>	<b>100%</b>		plancha retracción
Cal	10,8			3 probetas
Agua	14			



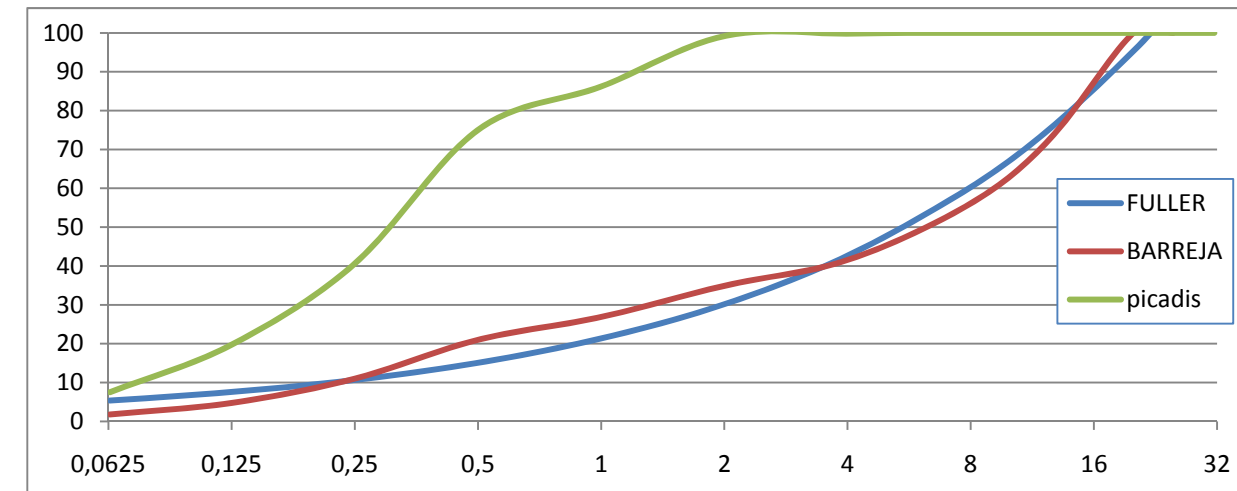
Dosificación II - 24/02/10			
Grava 11/22	3	30,00%	10 kg cono de abrams respecto 30, baja 19=11cm plancha retracción 1 probeta
Grava 6/12	2,4	24,00%	
Arena 0/5	2,6	26,00%	
Chamota	2	20,00%	
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>100%</b>	
Cal	2		
Agua	3		



Dosificación III - 03/03/10			
Grava 11/22	3	30,00%	10 kg cono de abrams respecto 30, baja 14=16cm plancha retracción 1 probeta
Grava 6/12	2,4	24,00%	
Arena 0/5	2,6	26,00%	
Chamota	2	20,00%	
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>100%</b>	
Cal	2		
Agua	2,8		

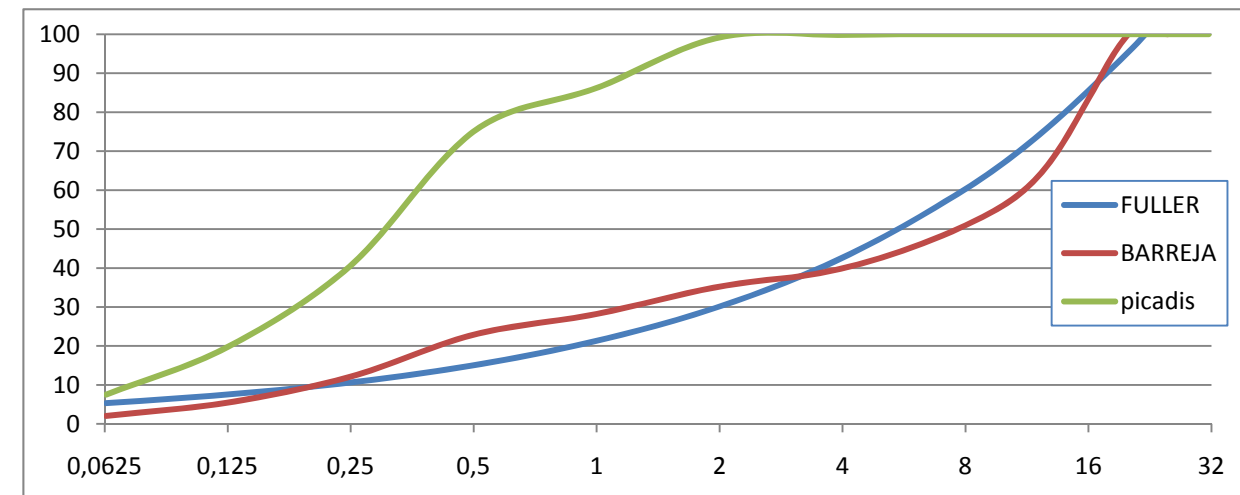
  

Dosificación IV - 03/03/10			
Grava 11/22	3	30,00%	10 kg cono de abrams respecto 30, baja 13,5=16,5cm plancha retracción 1 probeta
Grava 6/12	2,4	24,00%	
Arena 0/5	2,6	26,00%	
Chamota	2	20,00%	
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>100%</b>	
Cal	2		
Agua	2,7		



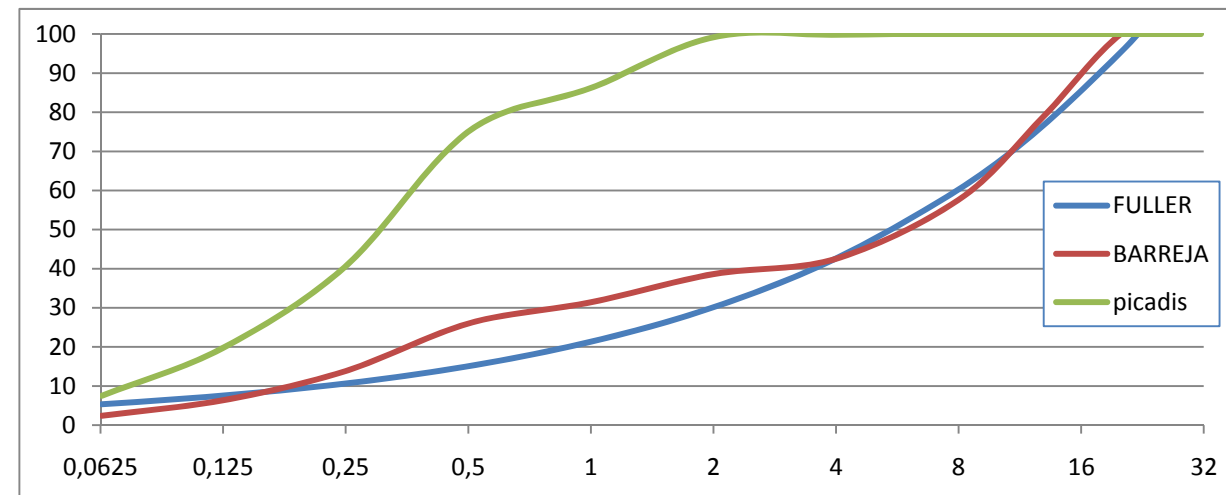
Dosificación V - 17/03/10				
Grava 11/22	3,8	38,00%	10 kg	cono de abrams respecto 30, baja 13=17cm
Grava 6/12	1,9	19,00%		
Arena 0/5	1,8	18,00%	plancha retracción 1 probeta	
Chamota	2,5	25,00%		
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>100%</b>		
Cal	2,5			
Agua	3,37			

Dosificación VI - 17/03/10				
Grava 11/22	3,8	38,00%	10 kg	cono de abrams respecto 30, baja 13,3=16,7cm
Grava 6/12	1,9	19,00%		
Arena 0/5	1,8	18,00%	plancha retracción 1 probeta	
Chamota	2,5	25,00%		
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>100%</b>		
Cal	2,5			
Agua	3,4			



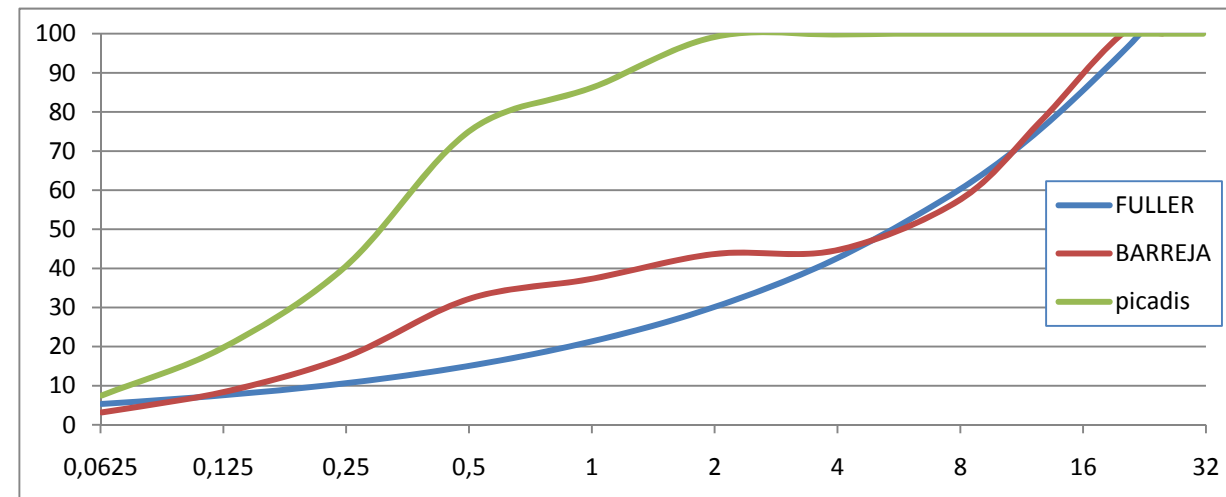
Dosificación VII - 23/03/10			
Grava 11/22	2,5	25,00%	10 kg cono de abrams respecto 30, baja 12=18cm plancha retracción 1 probeta
Grava 6/12	3	30,00%	
Arena 0/5	1,5	15,00%	
Chamota	3	30,00%	
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>100%</b>	
Cal	2		
Agua	2,93		

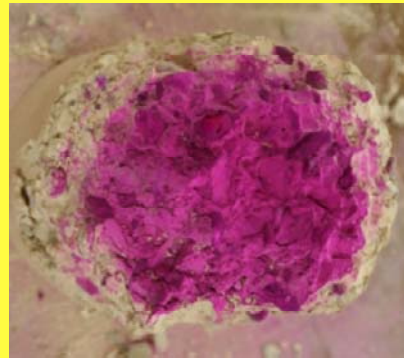
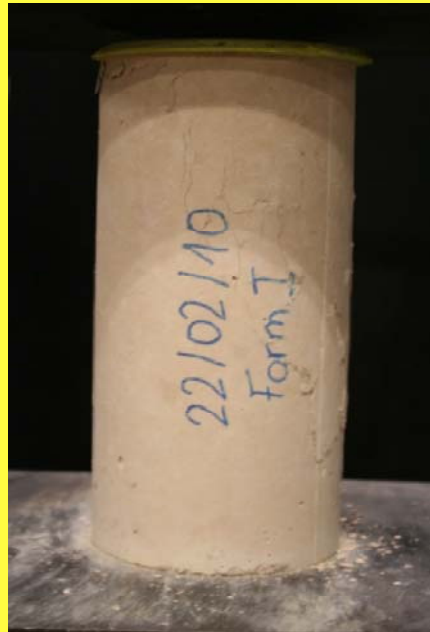
Dosificación VII - 23/03/10			
Grava 11/22	2,5	25,00%	10 kg cono de abrams respecto 30, baja 8,3=21,7cm 1 probeta
Grava 6/12	3	30,00%	
Arena 0/5	1,5	15,00%	
Chamota	3	30,00%	
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>100%</b>	
Cal	2		
Agua	2,827		



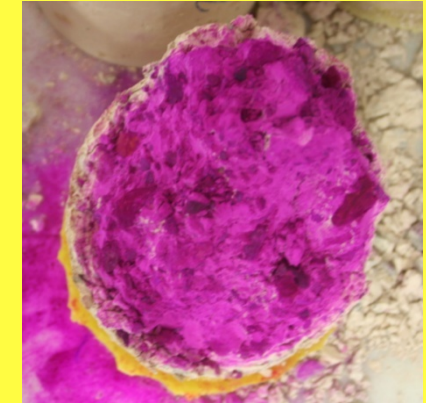
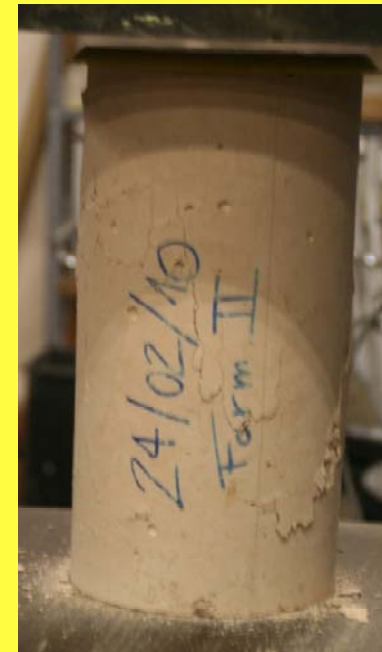
Dosificación VIII - 24/03/10				
Grava 11/22	2,5	25,00%	10 kg	cono de abrams
Grava 6/12	3	30,00%		respecto 30, baja 14,5=15,5cm
Arena 0/5	0,3	3,00%		1 probeta
Chamota	4,2	42,00%		
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>100%</b>		
Cal	2,8			
Agua	3,935			

Dosificación VIII - 26/03/10				
Grava 11/22	2,5	25,00%	10 kg	cono de abrams
Grava 6/12	3	30,00%		respecto 30, baja 9,9=20,1cm
Arena 0/5	0,3	3,00%		1 probeta
Chamota	4,2	42,00%		Pes dia 29/3/10 → 9,841Kg
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>100%</b>		
Cal	2,8			
Agua	3,822			

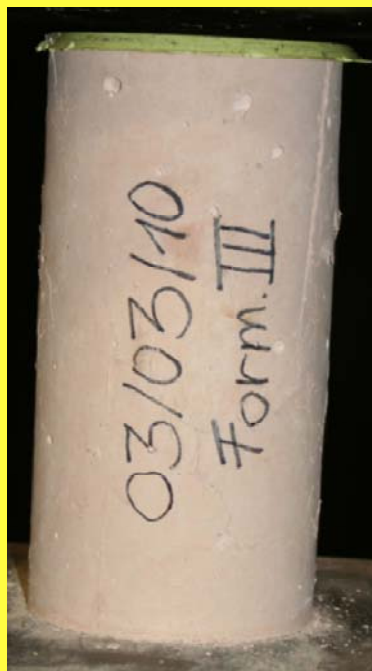




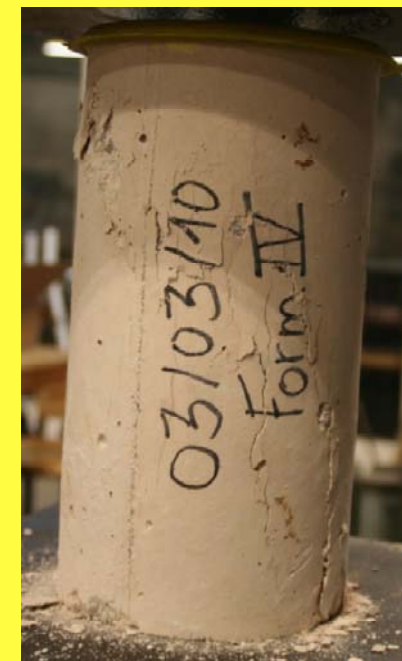
Probeta 22/02/10 (Hormigón I)  
Conservación: 210 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 8,94 kg/cm<sup>2</sup>



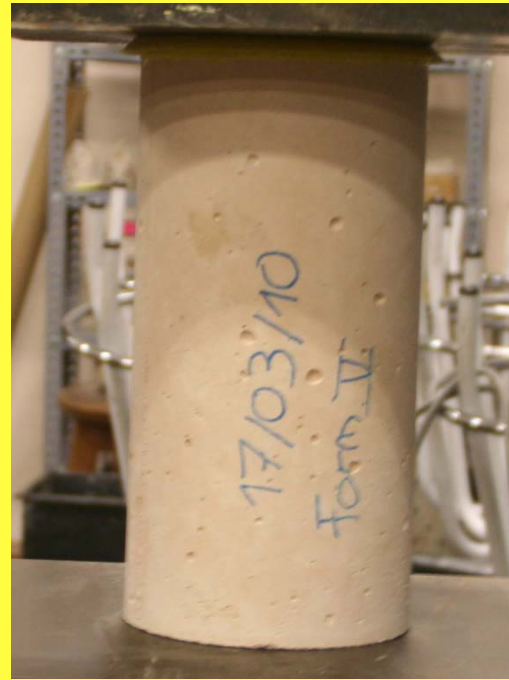
Probeta 22/02/10 (Hormigón II)  
Conservación: 150 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 8,32 kg/cm<sup>2</sup>



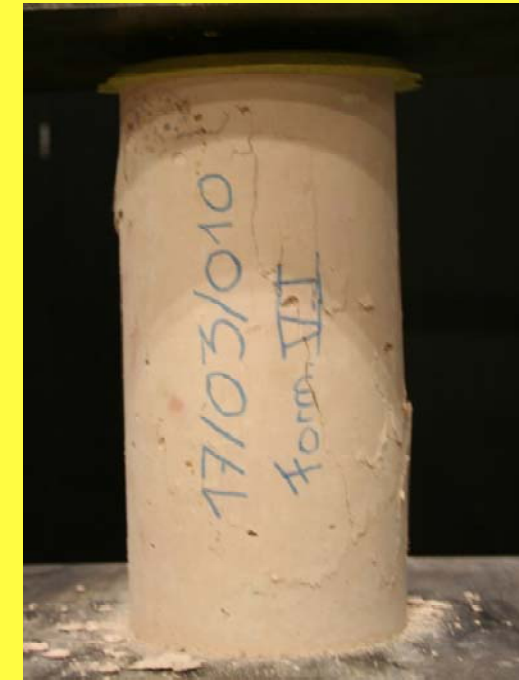
Probeta 03/03/10 (Hormigón III)  
Conservación: 200 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 8,88 kg/cm<sup>2</sup>



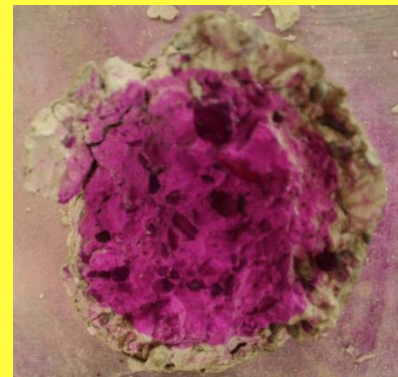
Probeta 03/03/10 (Hormigón IV)  
Conservación: 140 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 13,13 kg/cm<sup>2</sup>



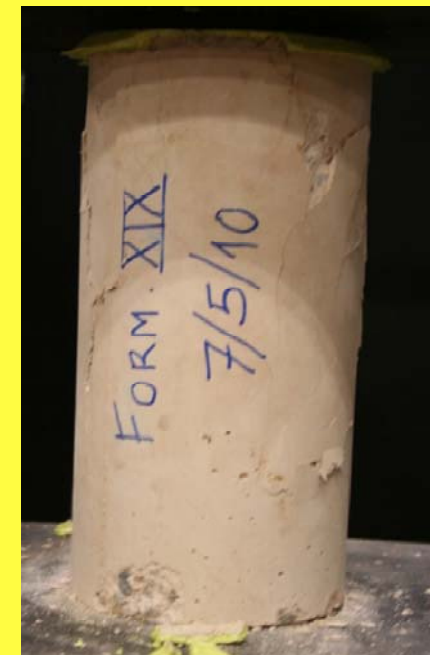
Probeta 17/03/10 (Hormigón V)  
Conservación: 120 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 11,09 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 17/03/10 (Hormigón VI)  
Conservación: 180 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 9,05 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 24/03/10 (Hormigón VII)  
Conservación: 173 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 13,98 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 07/05/10 (Hormigón IX)  
Conservación: 140 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 15,96 kg/cm<sup>2</sup>



TABLA DE RESULTADOS ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS			
Identificación probeta	Carga (kg)	Superficie (cm2)	Tensión Kg/cm2
22/02/2010 (Horm.I)	1580	176,71	8,94
24/02/2010 (Horm.II)	1470	176,71	8,32
03/03/2010 (Horm.III)	1570	176,71	8,88
03/03/2010 (Horm.IV)	2320	176,71	13,13
17/03/2010 (Horm.V)	1960	176,71	11,09
17/03/2010 (Horm.VI)	1600	176,71	9,05
24/03/2010 (Horm.VII)	2470	176,71	13,98
07/05/2010 (Horm.IX)	2820	176,71	15,96

TABLA DE RESULTADOS ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS			
Identificación probeta	Carga (kg)	Superficie (cm2)	Tensión Kg/cm2
28/05/2010 (1)	2470	176,71	13,98
28/05/2010 (2)	2200	176,71	12,45
28/05/2010 (3)	2310	176,71	13,07
28/05/2010 (4)	2920	176,71	16,52
28/05/2010 (5)	2440	176,71	13,81
28/05/2010 (6)	2550	176,71	14,43
28/05/2010 (7)	2440	176,71	13,81
31/05/2010 (1)	2460	176,71	13,92
31/05/2010 (2)	3360	176,71	19,01
31/05/2010 (3)	3380	176,71	19,13
31/05/2010 (4)	3120	176,71	17,66
31/05/2010 (5)	3110	176,71	17,60
31/05/2010 (6)	3540	176,71	20,03
31/05/2010 (7)	3130	176,71	17,71
01/06/2010 (1)	11100	176,71	62,81
01/06/2010 (2)	10500	176,71	59,42
01/06/2010 (3)	10240	176,71	57,95
01/06/2010 (4)	2830	176,71	16,01
01/06/2010 (5)	3010	176,71	17,03
01/06/2010 (6)	3260	176,71	18,45
01/06/2010 (7)	3030	176,71	17,15
04/06/2010 (1)	9190	176,71	52,01
04/06/2010 (2)	7430	176,71	42,05
04/06/2010 (3)	8330	176,71	47,14
04/06/2010 (4)	3140	176,71	17,77
04/06/2010 (5)	2730	176,71	15,45
04/06/2010 (6)	3010	176,71	17,03

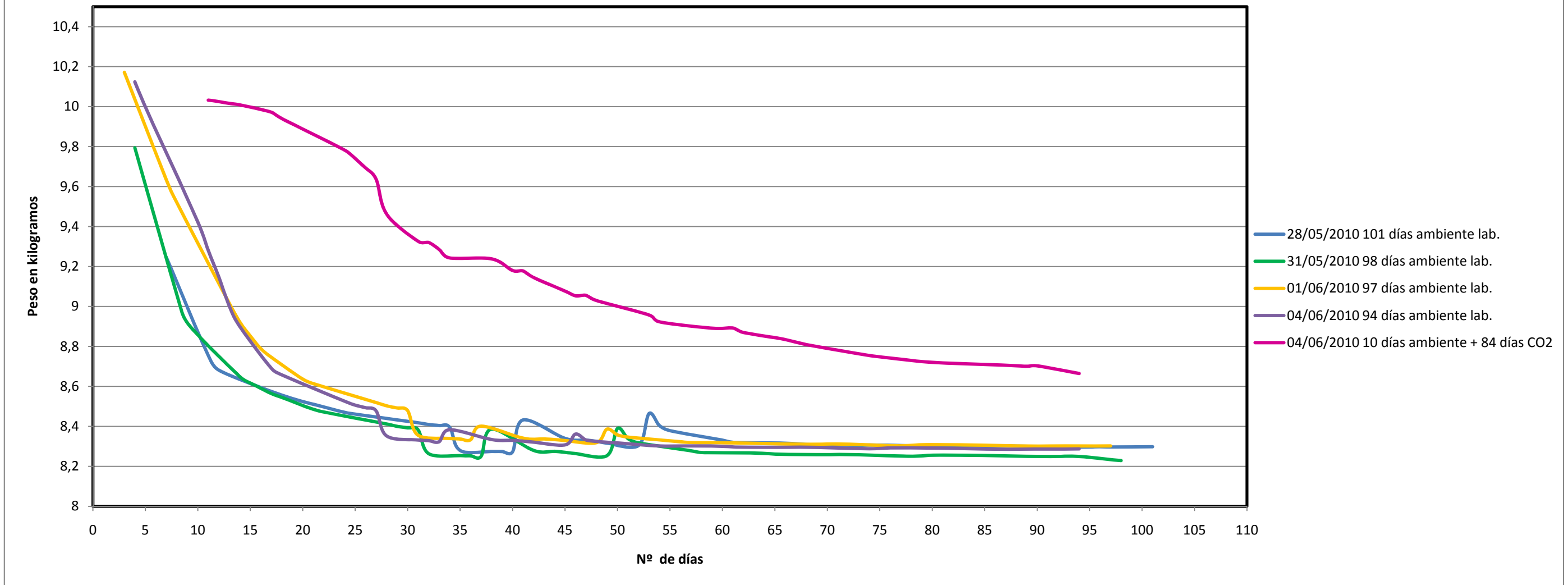
**2.4. Procedimiento de las probetas cilíndricas y ensayos utilizados. Control de seguimiento de pesos.**

TABLA DE PESOS (KG) DE PROBETAS DE DOSIFICACIÓN 1/1'7 -CAL/CHAMOTA-															
Nº de probeta	04/06/2010	08/06/2010	09/06/2010	14/06/2010	15/06/2010	16/06/2010	17/06/2010	18/06/2010	21/06/2010	22/06/2010	28/06/2010	29/06/2010	30/06/2010	01/07/2010	02/07/2010
28/05/2010 (1)	8,954	8,609	8,567	8,532	8,522	8,511	8,499	8,491	8,459	8,453	8,419	8,412	8,408	8,402	8,285
28/05/2010 (2)	8,966	8,52	8,478	8,437	8,427	8,415	8,405	8,394	8,359	8,351	8,315	8,307	8,302	8,296	8,181
28/05/2010 (3)	8,888	8,45	8,404	8,356	8,343	8,33	8,317	8,306	8,273	8,265	8,229	8,223	8,218	8,212	8,098
28/05/2010 (4)	9,285	8,786	8,737	8,682	8,669	8,653	8,64	8,629	8,592	8,585	8,547	8,539	8,534	8,527	8,408
28/05/2010 (5)	9,672	9,05	8,963	8,824	8,802	8,783	8,765	8,749	8,701	8,692	8,642	8,633	8,627	8,619	8,498
28/05/2010 (6)	9,487	8,946	8,822	8,596	8,567	8,543	8,52	8,502	8,453	8,441	8,386	8,375	8,369	8,359	8,241
28/05/2010 (7)	9,465	8,909	8,797	8,595	8,566	8,544	8,52	8,504	8,451	8,44	8,386	8,375	8,369	8,36	8,242
31/05/2010 (1)	9,662	8,799	8,716	8,611	8,593	8,576	8,556	8,543	8,498	8,487	8,442	8,432	8,426	8,418	8,3
31/05/2010 (2)	9,714	8,962	8,805	8,584	8,55	8,526	8,499	8,478	8,419	8,405	8,345	8,333	8,326	8,316	8,197
31/05/2010 (3)	10,026	9,195	9,049	8,82	8,79	8,766	8,742	8,724	8,667	8,655	8,598	8,587	8,58	8,571	8,449
31/05/2010 (4)	9,825	9,102	8,943	8,626	8,595	8,566	8,537	8,517	8,455	8,442	8,379	8,367	8,36	8,35	8,23
31/05/2010 (5)	9,779	9,116	8,967	8,651	8,612	8,582	8,552	8,531	8,466	8,451	8,385	8,372	8,364	8,354	8,234
31/05/2010 (6)	9,85	9,192	9,031	8,638	8,598	8,567	8,534	8,512	8,443	8,426	8,358	8,344	8,336	8,325	8,206
31/05/2010 (7)	9,701	9,053	8,915	8,613	8,58	8,553	8,528	8,509	8,449	8,436	8,376	8,364	8,356	8,346	8,228
01/06/2010 (1)	10,008	9,472	9,352	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)
01/06/2010 (2)	10,114	9,57	9,446	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)
01/06/2010 (3)	10,062	9,526	9,416	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)
01/06/2010 (4)	10,266	9,668	9,549	9,095	9,003	8,932	8,868	8,826	8,715	8,692	8,598	8,581	8,571	8,558	8,433
01/06/2010 (5)	10,142	9,7	9,597	9,104	9,004	8,926	8,855	8,807	8,69	8,668	8,571	8,554	8,543	8,53	8,406
01/06/2010 (6)	10,094	9,529	9,406	8,878	8,788	8,722	8,662	8,62	8,509	8,486	8,387	8,37	8,36	8,346	8,224
01/06/2010 (7)	10,184	9,638	9,527	8,985	8,893	8,829	8,771	8,731	8,631	8,61	8,52	8,505	8,494	8,481	8,358
04/06/2010 (1)	-	10,251	10,127	CO2(9/6/10)	10,121	10,114	10,106	10,097	10,062	10,033	9,857	9,811	9,766	9,706	9,532
04/06/2010 (2)	-	10,08	9,946	CO2(9/6/10)	9,937	9,928	9,919	9,913	9,879	9,849	9,699	9,66	9,611	9,557	9,378
04/06/2010 (3)	-	10,174	10,048	CO2(9/6/10)	10,039	10,034	10,023	10,016	9,976	9,939	9,791	9,749	9,702	9,647	9,475
04/06/2010 (4)	-	10,1	9,986	9,394	9,251	9,121	8,974	8,874	8,673	8,64	8,512	8,493	8,481	8,464	8,34
04/06/2010 (5)	-	10,212	10,082	9,543	9,396	9,26	9,106	8,994	8,77	8,735	8,598	8,578	8,564	8,548	8,421
04/06/2010 (6)	-	10,059	9,927	9,332	9,191	9,062	8,926	8,831	8,63	8,598	8,466	8,447	8,434	8,419	8,294

TABLA DE PESOS (KG) DE PROBETAS DE DOSIFICACIÓN 1/1'7 -CAL/CHAMOTA-															
05/07/2010	06/07/2010	07/07/2010	08/07/2010	12/07/2010	14/07/2010	15/07/2010	16/07/2010	19/07/2010	20/07/2010	21/07/2010	22/07/2010	27/07/2010	28/07/2010	02/08/2010	04/08/2010
8,283	8,284	8,282	-	8,366	-	-	-	8,319	8,492	8,428	8,401	-	8,337	8,333	8,326
8,178	8,178	8,177	-	8,282	-	-	-	8,262	8,348	8,303	8,286	-	8,248	8,247	8,242
8,095	8,095	8,094	-	8,153	-	-	-	8,118	8,29	8,229	8,202	-	8,142	8,138	8,132
8,405	8,405	8,403	-	8,471	-	-	-	8,429	8,659	8,58	8,546	-	8,467	8,457	8,449
8,491	8,491	8,488	-	8,539	-	-	-	8,504	8,659	8,602	8,579	-	8,523	8,517	8,511
8,233	8,232	8,23	-	8,284	-	-	-	8,246	8,38	8,329	8,306	-	8,257	8,254	8,248
8,234	8,233	8,231	-	8,282	-	-	-	8,247	8,418	8,355	8,328	-	8,268	8,263	8,256
8,292	8,293	8,29	-	8,328	-	-	-	8,302	8,452	8,398	8,375	-	8,323	8,32	8,313
8,188	8,187	8,184	-	8,236	-	-	-	8,199	8,355	8,295	8,269	-	8,211	8,208	8,202
8,44	8,439	8,436	-	8,458	-	-	-	8,435	8,592	8,534	8,51	-	8,457	8,454	8,448
8,22	8,219	8,216	-	8,253	-	-	-	8,222	8,36	8,309	8,287	-	8,238	8,234	8,229
8,223	8,222	8,219	-	8,236	-	-	-	8,215	8,36	8,309	8,287	-	8,237	8,234	8,228
8,194	8,193	8,189	-	8,206	-	-	-	8,185	8,266	8,234	8,221	-	8,19	8,19	8,186
8,218	8,216	8,213	-	8,241	-	-	-	8,216	8,341	8,293	8,273	-	8,229	8,228	8,222
SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)
SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)
SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)
8,417	8,415	8,41	-	8,429	-	-	-	8,402	8,501	8,46	8,444	-	8,407	8,405	8,4
8,39	8,386	8,382	-	8,375	-	-	-	8,357	8,388	8,376	8,372	-	8,353	8,354	8,349
8,208	8,206	8,202	-	8,205	-	-	-	8,186	8,253	8,223	8,212	-	8,187	8,18	8,183
8,343	8,34	8,336	-	8,354	-	-	-	8,328	8,402	8,37	8,357	-	8,328	8,328	8,323
9,406	9,401	9,363	9,316	9,313	9,24	9,243	9,21	9,14	9,117	9,119	9,092	9,023	8,988	8,953	8,96
9,225	9,218	9,185	9,146	9,142	9,112	9,107	9,078	9,013	8,991	8,992	8,968	8,896	8,862	8,832	8,828
9,347	9,342	9,309	9,267	9,26	9,188	9,183	9,147	9,078	9,052	9,056	9,029	8,954	8,919	8,889	8,889
8,32	8,317	8,311	-	8,342	-	-	-	8,305	8,366	8,321	8,316	-	8,294	8,295	8,29
8,401	8,398	8,392	-	8,391	-	-	-	8,369	8,419	8,398	8,389	-	8,366	8,366	8,361
8,274	8,271	8,266	-	8,269	-	-	-	8,247	8,299	8,276	8,268	-	8,244	8,245	8,239

TABLA DE PESOS (KG) DE PROBETAS DE DOSIFICACIÓN 1/1'7 -CAL/CHAMOTA-																
05/08/2010	09/08/2010	11/08/2010	17/08/2010	19/08/2010	23/08/2010	30/08/2010	01/09/2010	02/09/2010	06/09/2010	08/09/2010	09/09/2010	13/09/2010	14/09/2010	15/09/2010	20/09/2010	
8,325	8,323	8,324	8,317	8,322	8,321	8,315	8,319	8,317	8,319	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,24	8,239	8,241	8,234	8,238	8,236	8,231	8,233	8,231	8,232	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,13	8,128	8,13	8,123	8,128	8,127	8,122	8,123	8,123	8,125	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,446	8,442	8,443	8,435	8,439	8,437	8,431	8,433	8,432	8,433	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,51	8,507	8,508	8,5	8,504	8,502	8,496	8,498	8,496	8,498	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,246	8,245	8,246	8,238	8,242	8,241	8,235	8,237	8,236	8,236	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,255	8,252	8,253	8,245	8,248	8,247	8,241	8,242	8,241	8,242	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,313	8,31	8,312	8,305	8,309	8,308	8,303	8,305	8,304	8,304	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,2	8,198	8,199	8,19	8,195	8,194	8,187	8,189	8,188	8,189	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,446	8,445	8,445	8,438	8,442	8,441	8,435	8,437	8,436	8,438	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,228	8,227	8,227	8,219	8,223	8,222	8,215	8,216	8,216	8,217	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,227	8,225	8,227	8,219	8,223	8,222	8,216	8,218	8,217	8,218	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,184	8,183	8,184	8,17	8,181	8,181	8,175	8,177	8,176	8,023	Ensayo absorción/desorción						
8,221	8,22	8,22	8,213	8,217	8,216	8,211	8,213	8,211	8,213	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	9,907	9,719	9,624	9,579	9,442	9,411	9,374	9,261
SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	9,942	Ensayo absorción/desorción						
SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	SUM(9/6/10)	9,982	9,849	9,78	9,748	9,638	9,611	9,585	9,477
8,398	8,395	8,396	8,387	8,391	8,39	8,382	8,384	8,383	8,384	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,348	8,346	8,348	8,342	8,345	8,344	8,339	8,341	8,339	8,34	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,182	8,182	8,183	8,17	8,18	8,179	8,173	8,175	8,175	8,175	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,321	8,319	8,32	8,312	8,316	8,315	8,309	8,31	8,309	8,31	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
-	8,901	8,876	8,824	8,811	8,791	8,778	8,773	8,776	8,78	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
-	8,767	8,741	8,686	8,674	8,649	8,632	8,627	8,629	8,505	Ensayo absorción/desorción						
-	8,836	8,811	8,754	8,742	8,721	8,708	8,702	8,704	8,709	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,288	8,288	8,288	8,28	8,285	8,284	8,277	8,279	8,278	8,279	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,36	8,359	8,36	8,352	8,356	8,355	8,349	8,35	8,35	8,351	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	
8,239	8,238	8,239	8,232	8,235	8,235	8,229	8,231	8,23	8,231	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	Peso const.	

### Control de seguimiento de peso de las probetas cilíndricas



### 3. ENSAYOS

Ensayos de porosidad y densidad

Determinación de absorción por capilaridad

Determinación de desorción por capilaridad

Difracción de rayos X (DRX)

Determinación de resistencia a compresión

### 3.1 Ensayos de porosidad y densidad

Ensayo de porosidad realizado a las probetas cilíndricas (pieza entera)						
Series	Peso hidro.	Peso sat.	Peso sec	Dens. apar.	Dens. rel.	Porosidad
31/05/2010 (6)	5103	10015	8023	1,57	2,58	39,0
04/06/2010 (2)	5168	10354	8505	1,65	2,56	35,8
01/06/2010 (2)	5165	9966	9180	1,78	2,10	15,2

31/05/2010 (6)	92 días ambiente laboratorio
04/06/2010 (2)	90 días en cámara de CO <sub>2</sub>
01/06/2010 (2)	90 días fraguado hidráulico (sumergidas en agua)

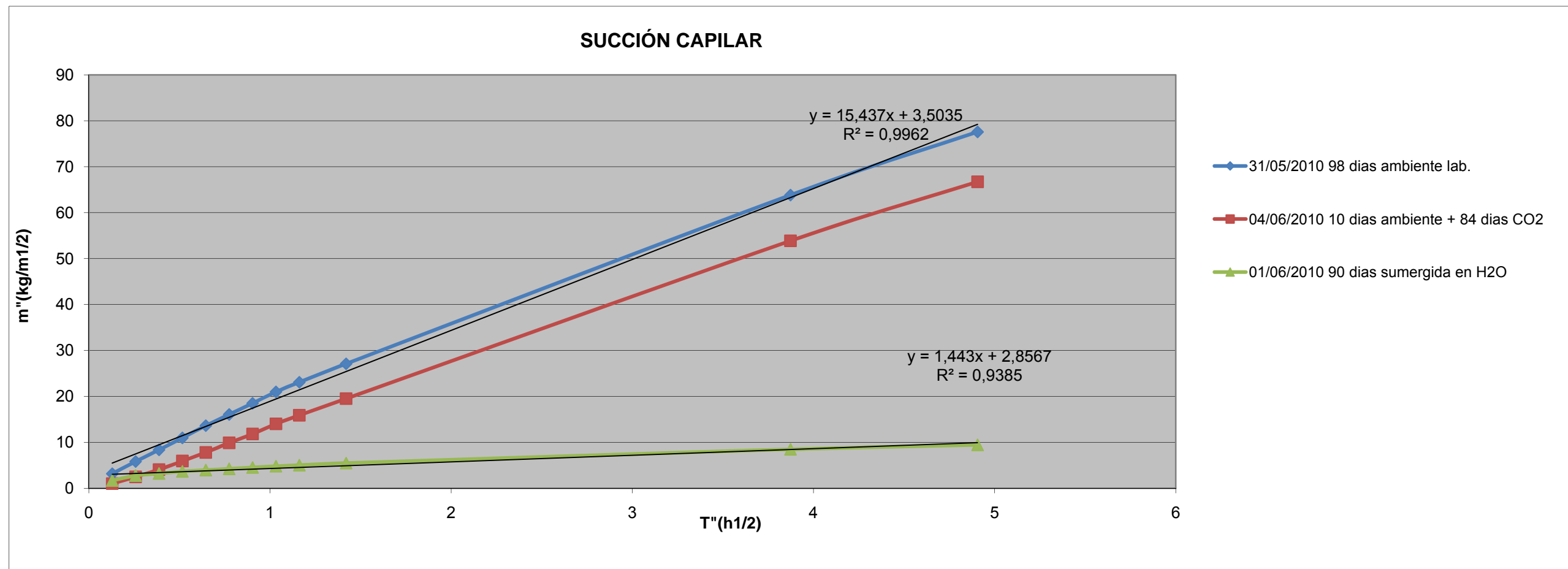
### 3.2 Determinación de absorción por capilaridad

ENSAYO DE CAPILARIDAD (06/09/2010)				
Fecha fabricación		31/05/2010	04/06/2010	01/06/2010
T. absorción	T.acumulado	Peso	Peso	Peso
0 (min)	0 (min)	8,023	8,505	9,18
1	1	8,079	8,523	9,21
3	4	8,126	8,549	9,229
5	9	8,171	8,577	9,237
7	16	8,217	8,61	9,245
9	25	8,264	8,643	9,25
11	36	8,307	8,68	9,255
13	49	8,35	8,714	9,26
15	64	8,394	8,753	9,265
17	81	8,431	8,786	9,269
40	121	8,502	8,85	9,277
780	900	9,151	9,457	9,33
540	1440	9,394	9,684	9,347

FECHA:	07/09/2010		
MUESTRA:	31/05/2010		
"S" (m*2):	0,0176715	"Mo" (Kg):	8,023
"T"(min)	"T"(h1/2)	"Mi"(Kg)	m"(Kg/m*2)
1	0,12909944	8,079	3,16894435
4	0,25819889	8,126	5,82859406
9	0,38729833	8,171	8,3750672
16	0,51639778	8,217	10,9781286
25	0,64549722	8,264	13,6377783
36	0,77459667	8,307	16,0710749
49	0,90369611	8,35	18,5043714
64	1,03279556	8,394	20,9942563
81	1,161895	8,431	23,0880231
121	1,42009389	8,502	27,1057918
900	3,87298335	9,151	63,8315932
1444	4,90577891	9,394	77,5825482

FECHA:	07/09/2010		
MUESTRA:	04/06/2010		
"S" (m*2):	0,0176715	"Mo" (kg):	8,505
"T"(min)	"T"(h1/2)	"Mi"(Kg)	m"(Kg/m1/2)
1	0,12909944	8,523	1,01858925
4	0,25819889	8,549	2,48988484
9	0,38729833	8,577	4,07435702
16	0,51639778	8,61	5,94177065
25	0,64549722	8,643	7,80918428
36	0,77459667	8,68	9,90295108
49	0,90369611	8,714	11,826953
64	1,03279556	8,753	14,0338964
81	1,161895	8,786	15,90131
121	1,42009389	8,85	19,5229607
900	3,87298335	9,457	53,8720539
1444	4,90577891	9,684	66,7175961

FECHA:	20/09/2010		
MUESTRA:	01/06/2010		
"S" (m*2):	0,0176715	"Mo" (kg):	9,18
"T"(min)	"T"(h1/2)	"Mi"(Kg)	m"(Kg/m1/2)
1	0,12909944	9,21	1,69764876
4	0,25819889	9,229	2,7728263
9	0,38729833	9,237	3,22553264
16	0,51639778	9,245	3,67823897
25	0,64549722	9,25	3,96118043
36	0,77459667	9,255	4,24412189
49	0,90369611	9,26	4,52706335
64	1,03279556	9,265	4,81000481
81	1,161895	9,269	5,03635798
121	1,42009389	9,277	5,48906431
900	3,87298335	9,33	8,48824378
1444	4,90577891	9,347	9,45024474





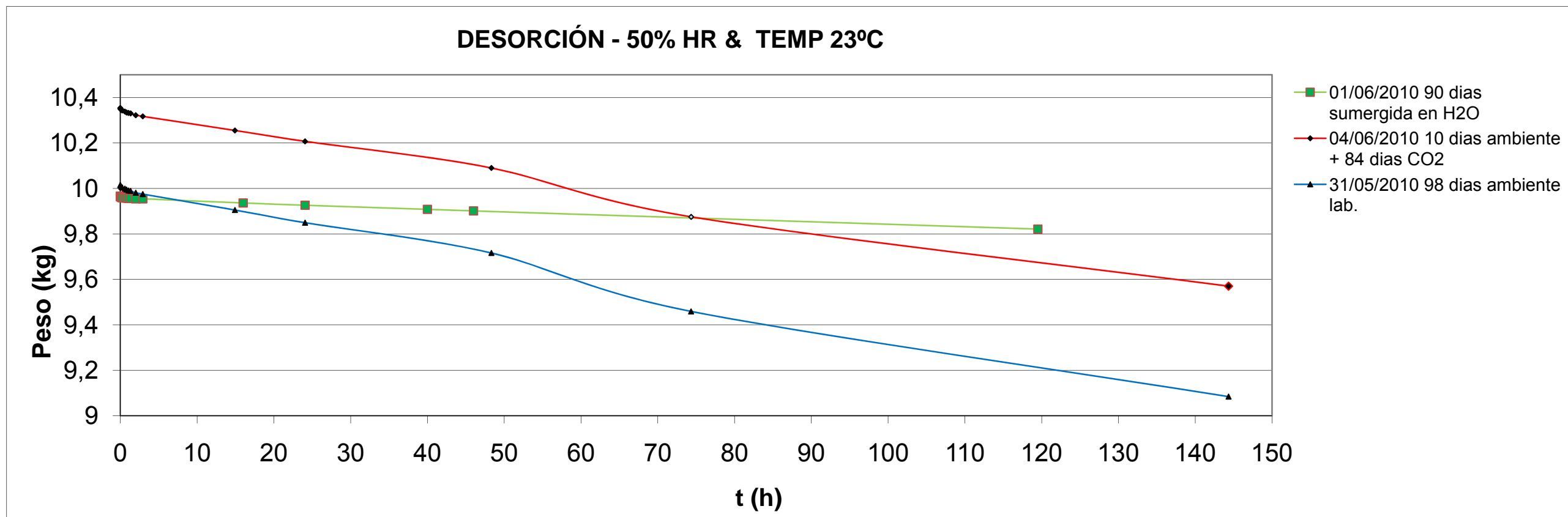
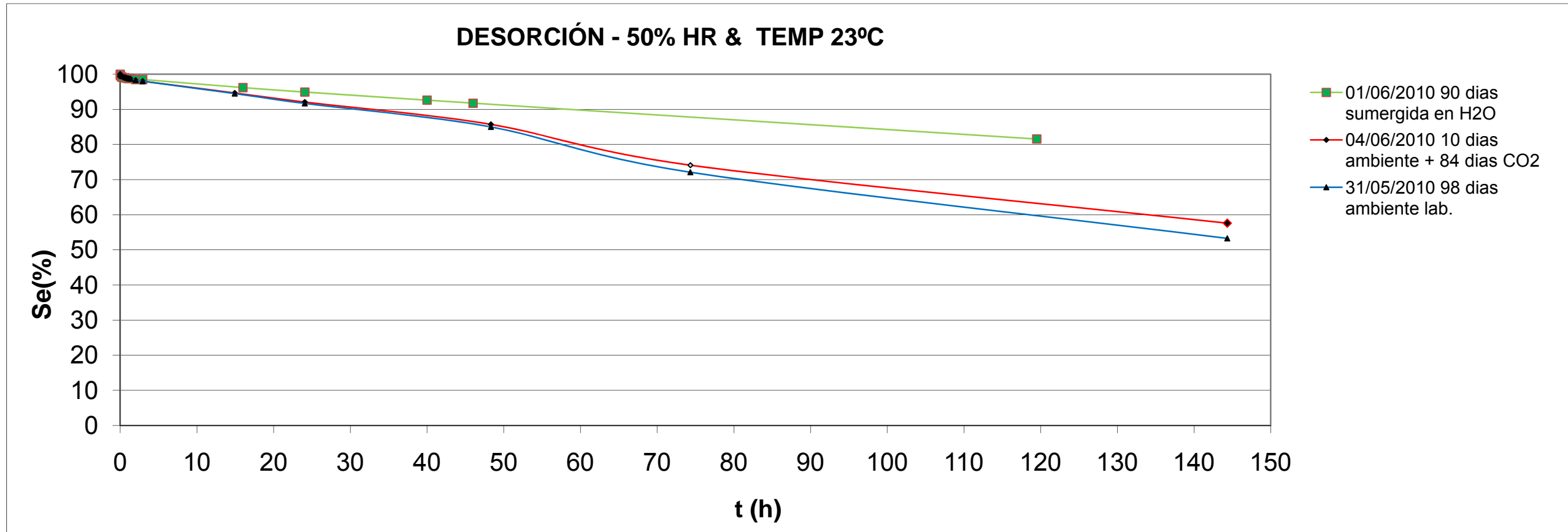
3.3 Determinación de desorción por capilaridad

FECHA:	20-sep-10			
MUESTRA:	31/05/2010			
Mo.fin":	8,023	"Msat":	10,015	
"T"(min)	"T"(horas)	"Mi"(Kg)	We(%)	Se(%)
0	0	10,015	24,82862	100
1	0,016666667	10,013	24,80369	99,8996
9	0,15	10,007	24,7289	99,59839
16	0,266666667	10,004	24,69151	99,44779
36	0,6	9,999	24,62919	99,19679
49	0,816666667	9,995	24,57933	98,99598
64	1,066666667	9,991	24,52948	98,79518
81	1,35	9,989	24,50455	98,69478
121	2,016666667	9,981	24,40484	98,29317
176	2,933333333	9,975	24,33005	97,99197
896	14,933333333	9,905	23,45756	94,47791
1444	24,066666667	9,849	22,75957	91,66667
2900	48,333333333	9,716	21,10183	84,98996
4460	74,333333333	9,459	17,89854	72,08835
8660	144,333333333	9,084	13,22448	53,26305

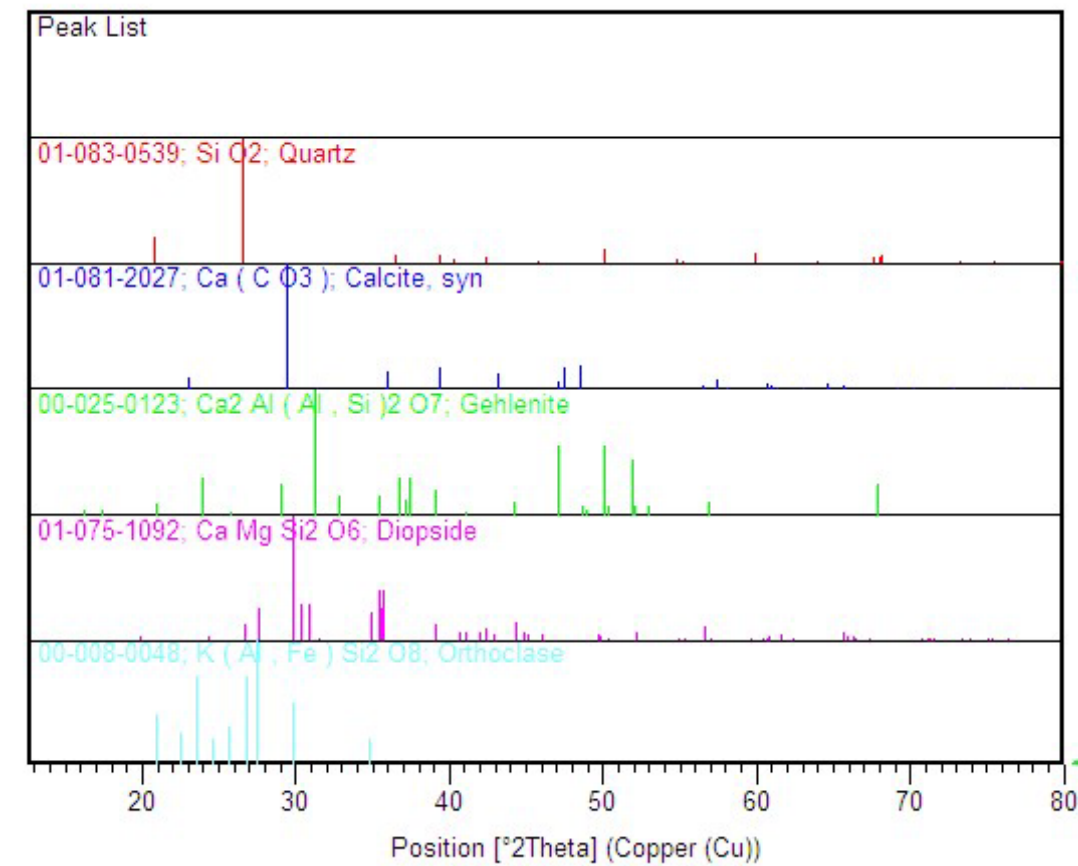
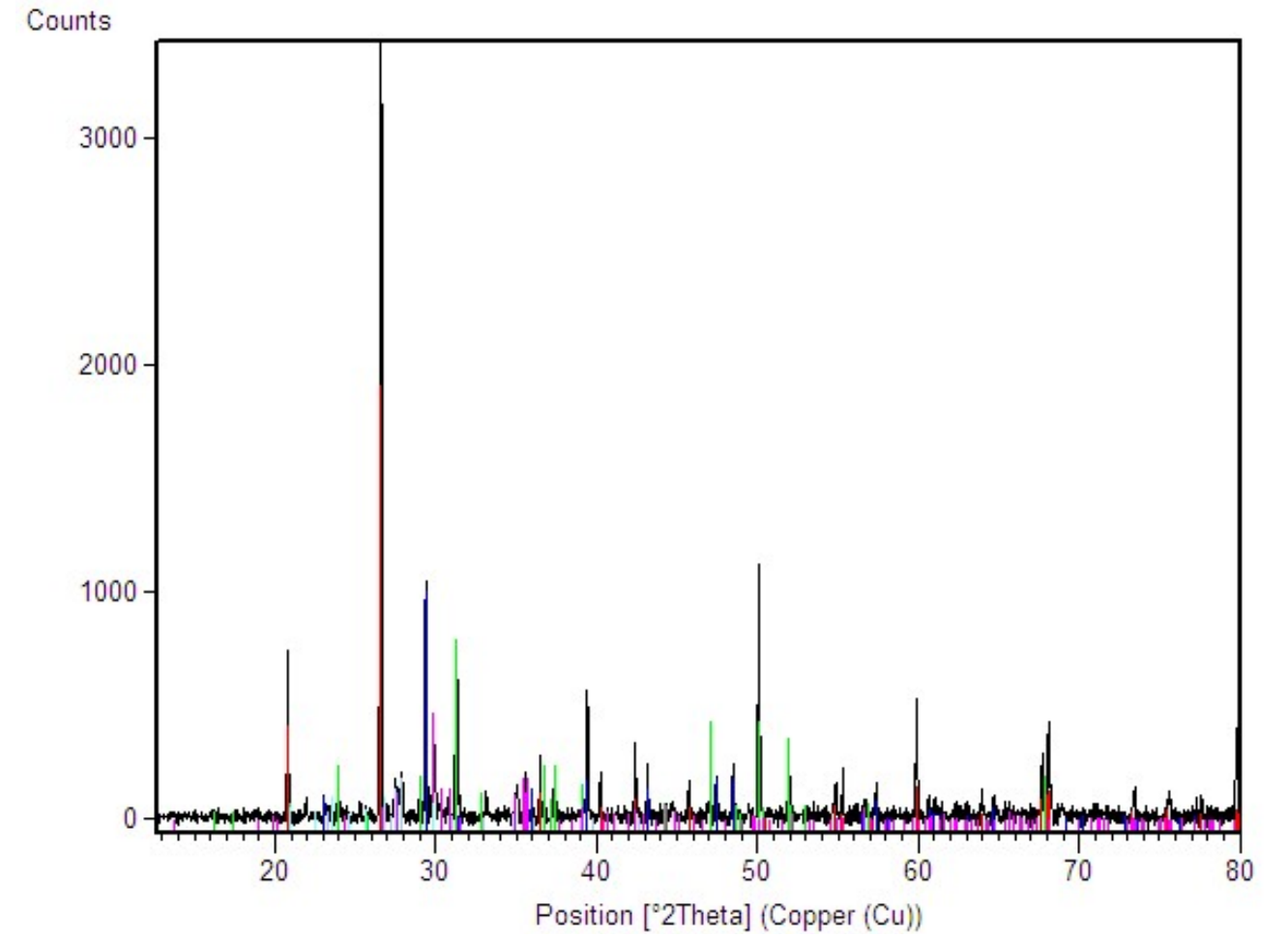
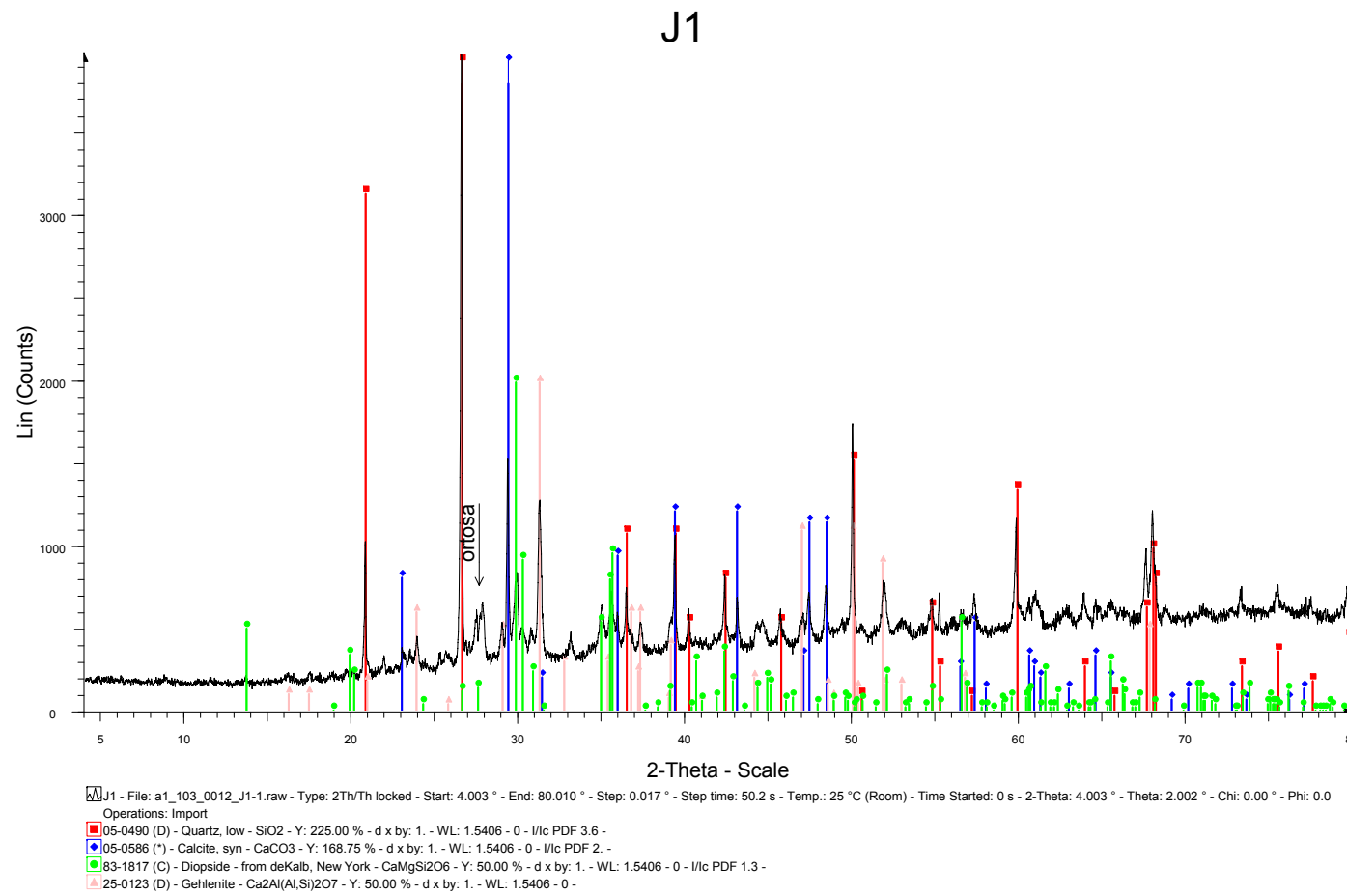
FECHA:	20-sep-10			
MUESTRA:	01/06/2010			
Mo.fin":	9,18	"Msat":	9,966	
"T"(min)	"T"(horas)	"Mi"(Kg)	We(%)	Se(%)
0	0	9,966	8,5620915	100
1	0,016666667	9,963	8,52941176	99,6183206
9	0,15	9,96	8,49673203	99,2366412
16	0,266666667	9,959	8,48583878	99,1094148
36	0,6	9,958	8,47494553	98,9821883
49	0,816666667	9,957	8,46405229	98,8549618
64	1,066666667	9,956	8,45315904	98,7277354
81	1,35	9,956	8,45315904	98,7277354
121	2,016666667	9,954	8,43137255	98,4732824
176	2,933333333	9,954	8,43137255	98,4732824
960	16	9,936	8,23529412	96,1832061
1444	24,066666667	9,926	8,12636166	94,9109415
2400	40	9,908	7,93028322	92,6208651
2760	46	9,901	7,8540305	91,7302799
7170	119,5	9,821	6,98257081	81,5521628

ENSAYO DE DESORCIÓN (13/09/2010)				
Fecha fabricación	31/05/2010	04/06/2010	01/06/2010	
T. desorción	T.acumulado	Peso	Peso	Peso
0 (min)	0 (min)	10,015	10,354	9,966
1	1	10,013	10,35	9,963
8	9	10,007	10,345	9,96
7	16	10,004	10,343	9,959
20	36	9,999	10,338	9,958
13	49	9,995	10,334	9,957
15	64	9,991	10,332	9,956
17	81	9,989	10,33	9,956
40	121	9,981	10,322	9,954
55	176	9,975	10,317	9,954
720	896	9,905	10,255	-
64	960	-	-	9,936
484	1444	9,849	10,207	9,926
956	2400	-	-	9,908
360	2760	-	-	9,901
	2900	9,716	10,09	-
	4460	9,459	9,875	-
4410	7170	-	-	9,821
	8660	9,084	9,57	-

FECHA:	20-sep-10			
MUESTRA:	04/06/2010			
Mo.fin":	8,505	"Msat":	10,354	
"T"(min)	"T"(horas)	"Mi"(Kg)	We(%)	Se(%)
0	0	10,354	21,74	100
1	0,016666667	10,35	21,69	99,783667
9	0,15	10,345	21,63	99,51325
16	0,266666667	10,343	21,610817	99,405084
36	0,6	10,338	21,552028	99,134667
49	0,816666667	10,334	21,504997	98,918334
64	1,066666667	10,332	21,481481	98,810168
81	1,35	10,33	21,457966	98,702001
121	2,016666667	10,322	21,363904	98,269335
176	2,933333333	10,317	21,305115	97,998918
896	14,933333333	10,255	20,576132	94,645754
1444	24,066666667	10,207	20,011758	92,049757
2900	48,333333333	10,09	18,636096	85,722012
4460	74,333333333	9,875	16,108172	74,094105
8660	144,333333333	9,57	12,522046	57,598702



### 3.4 Difracción de rayos X (DRX)




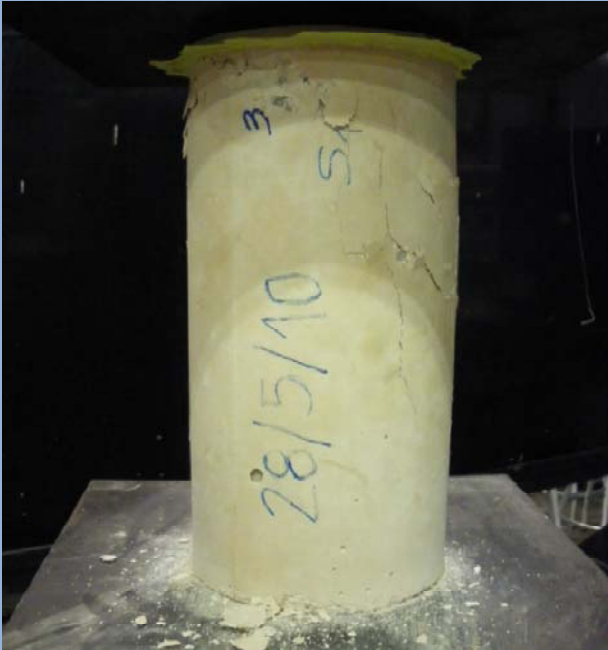
### 3.5 Determinación de resistencia a compresión



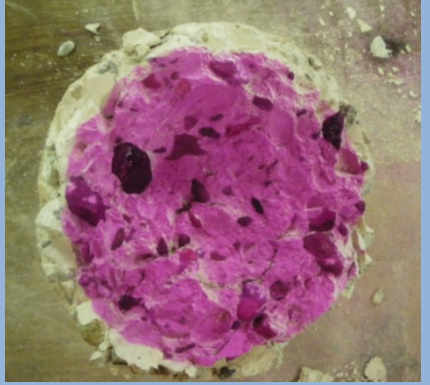
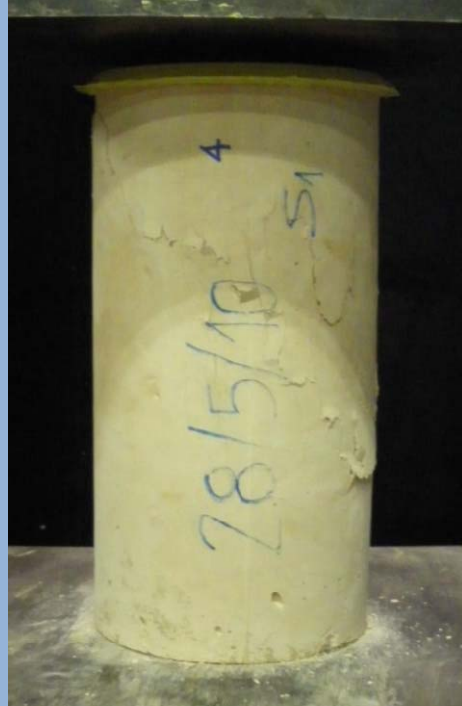
Probeta 28/5/10 (1)  
Conservación: 116 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 13,98 kg/cm<sup>2</sup>



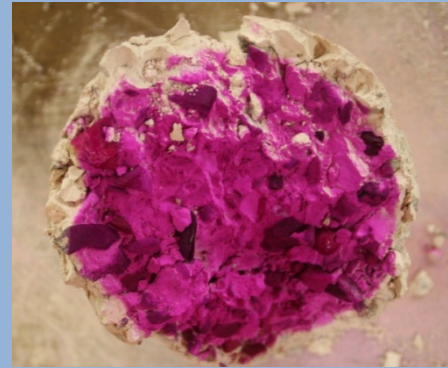
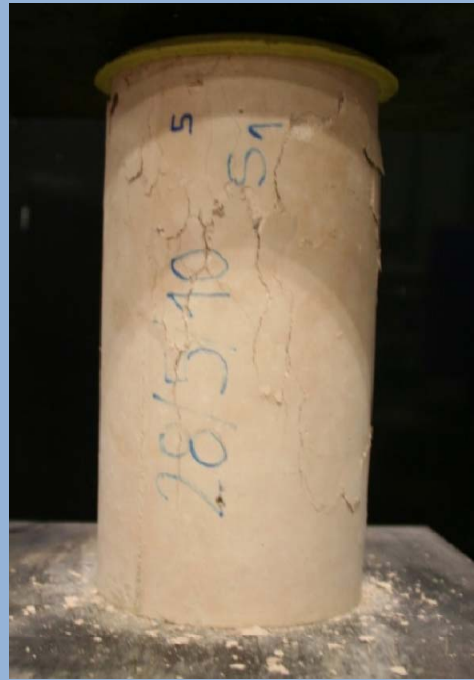
Probeta 28/5/10 (2)  
Conservación: 116 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: : 12,45 kg/cm<sup>2</sup>



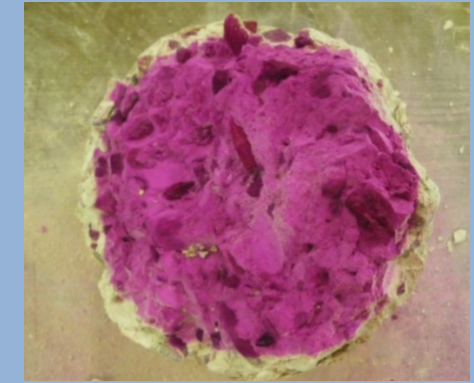
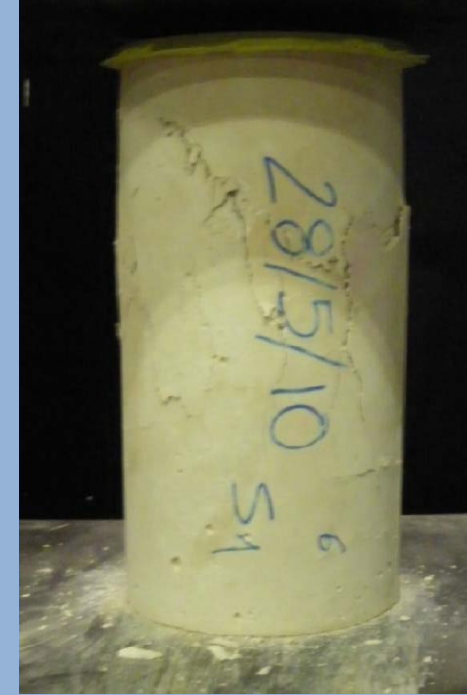
Probeta 28/5/10 (3)  
Conservación: 116 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 13,07 kg/cm<sup>2</sup>



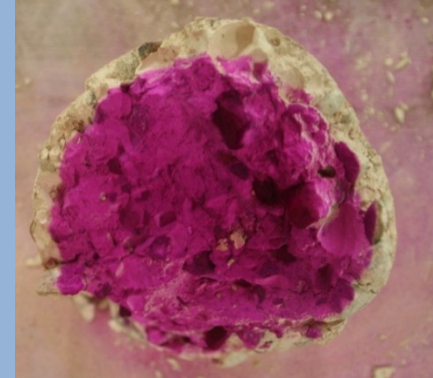
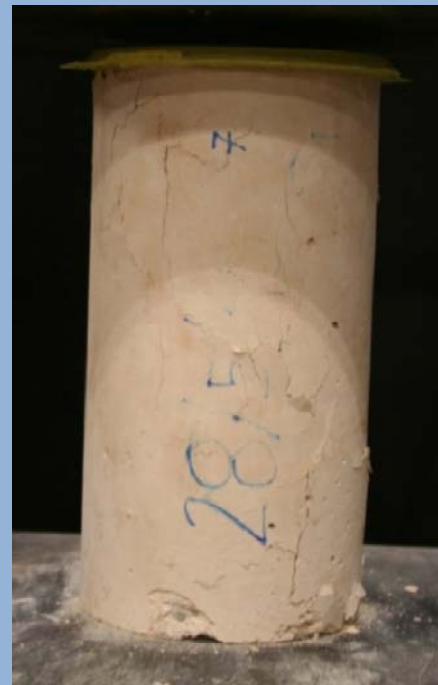
Probeta 28/5/10 (4)  
Conservación: 116 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 16,52 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 28/5/10 (5)  
Conservación: 116 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 13,81 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 28/5/10 (6)  
Conservación: 116 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 14,43 kg/cm<sup>2</sup>



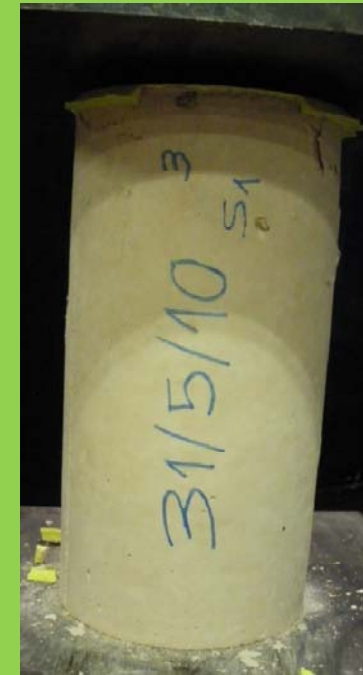
Probeta 28/5/10 (7)  
Conservación: 116 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 13,81 kg/cm<sup>2</sup>



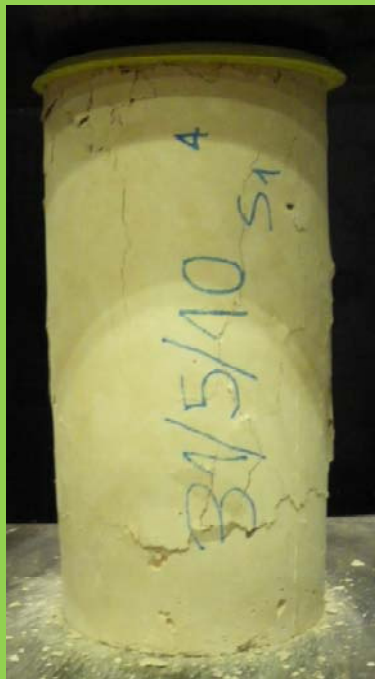
Probeta 31/5/10 (1)  
Conservación: 113 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 13,92 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 31/5/10 (2)  
Conservación: 113 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 19,01 kg/cm<sup>2</sup>



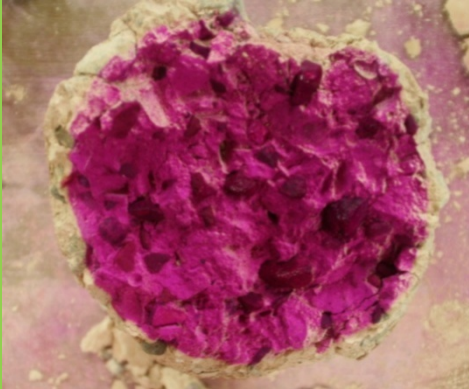
Probeta 31/5/10 (3)  
Conservación: 113 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 19,13 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 31/5/10 (4)  
Conservación: 113 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 17,66 kg/cm<sup>2</sup>




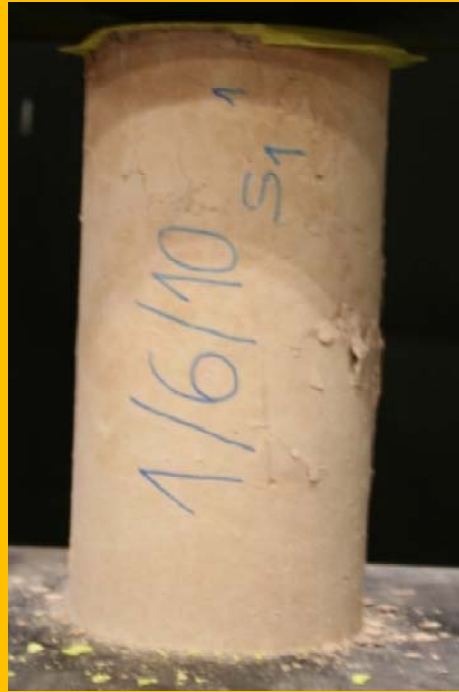
Probeta 31/5/10 (5)  
Conservación: 113 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 17,60 kg/cm<sup>2</sup>




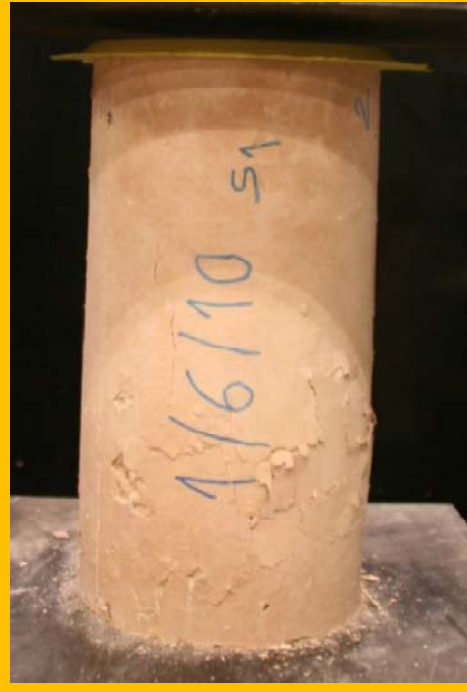
Probeta 31/5/10 (6)  
Conservación: 113 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 20,03 kg/cm<sup>2</sup>



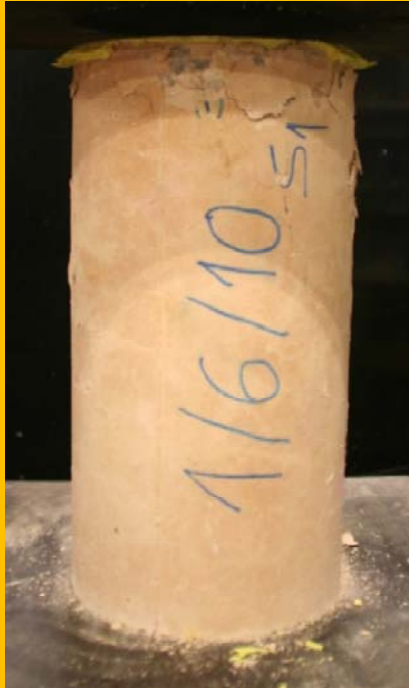
Probeta 31/5/10 (7)  
Conservación: 113 días ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 17,71 kg/cm<sup>2</sup>



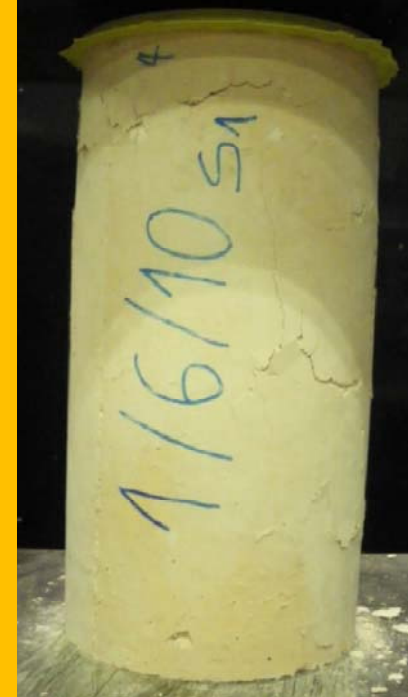
Probeta 01/06/10 (1)  
Conservación: 100 días sumergidas H<sub>2</sub>O + 12 días ambiente laboratorio.  
Tensión de rotura: 62,81 kg/cm<sup>2</sup>



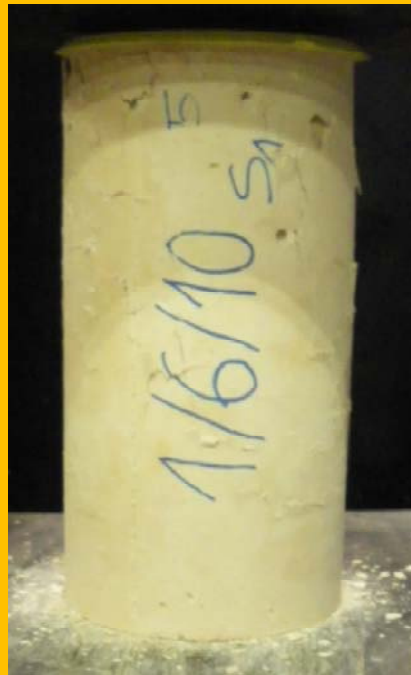
Probeta 01/06/10 (2)  
Conservación: 100 días sumergidas H<sub>2</sub>O + 12 días ambiente laboratorio.  
Tensión de rotura: 59,42 kg/cm<sup>2</sup>



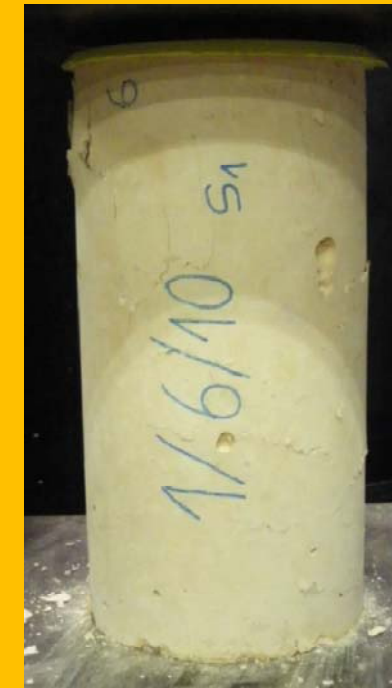
Probeta 01/06/10 (3)  
Conservación: 100 días sumergidas H2O + 12 días ambiente laboratorio.  
Tensión de rotura: 57,95 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 01/06/10 (4)  
Conservación: 112 días en ambiente de laboratorio  
Tensión de rotura: 16,01 kg/cm<sup>2</sup>

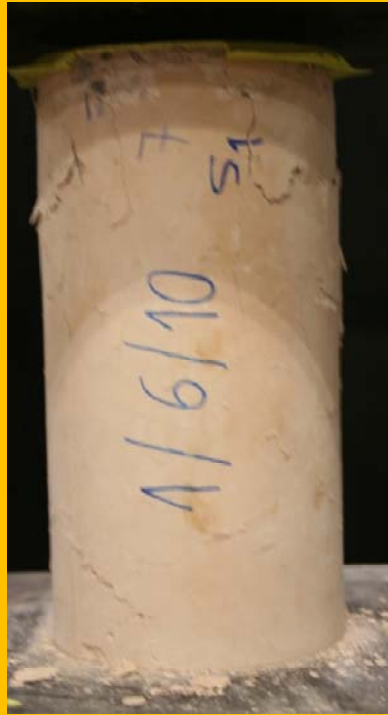


Probeta 01/06/10 (5)  
Conservación: 112 días en ambiente de laboratorio  
Tensión de rotura: 17,03 kg/cm<sup>2</sup>

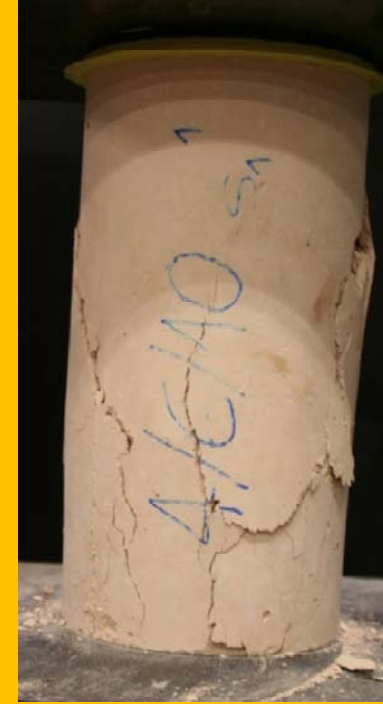


Probeta 01/06/10 (6)  
Conservación: 112 días en ambiente de laboratorio  
Tensión de rotura: 18,45 kg/cm<sup>2</sup>

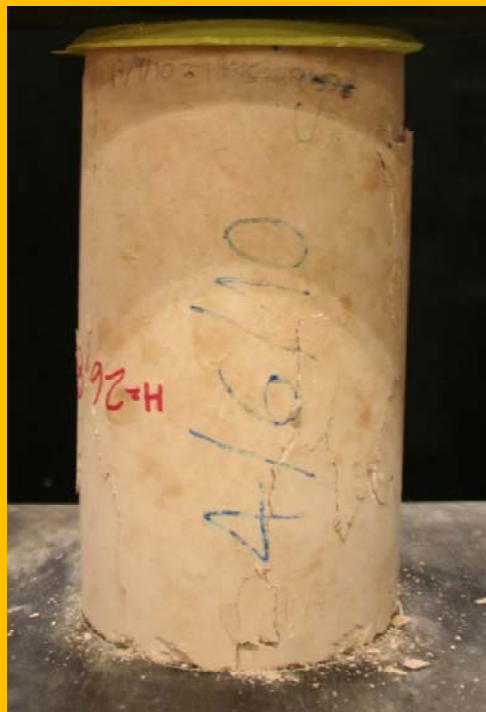




Probeta 01/06/10 (7)  
Conservación: 112 días en ambiente de laboratorio  
Tensión de rotura: 17,15 kg/cm<sup>2</sup>



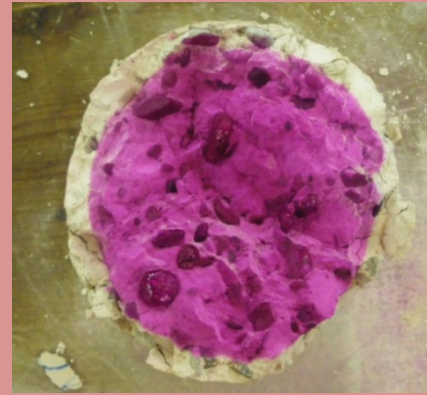
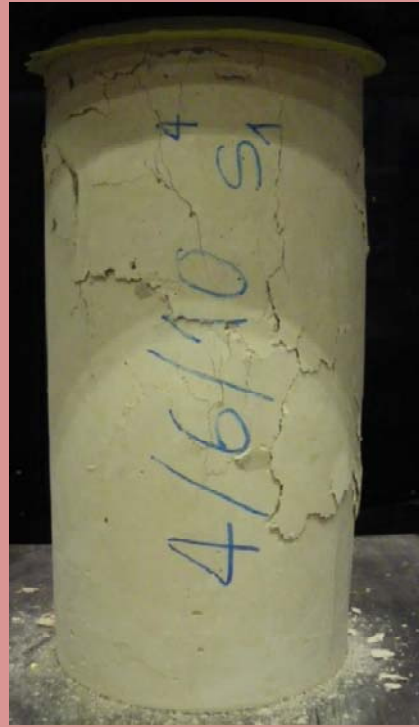
Probeta 04/06/10 (1)  
Conservación: 10 días en ambiente laboratorio + 99 días en cámara de CO<sub>2</sub>  
Tensión de rotura: 52,01 kg/cm<sup>2</sup>



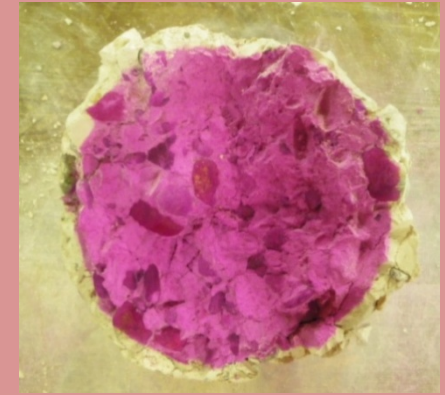
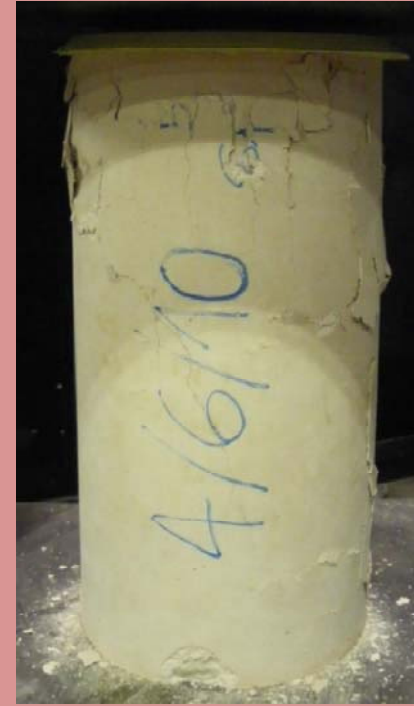
Probeta 04/06/10 (2)  
Conservación: 10 días en ambiente laboratorio + 99 días en cámara de CO<sub>2</sub>  
Tensión de rotura: 42,05 kg/cm<sup>2</sup>



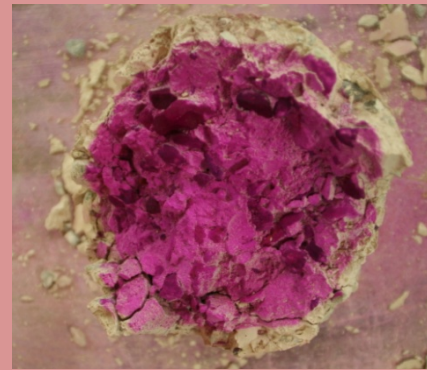
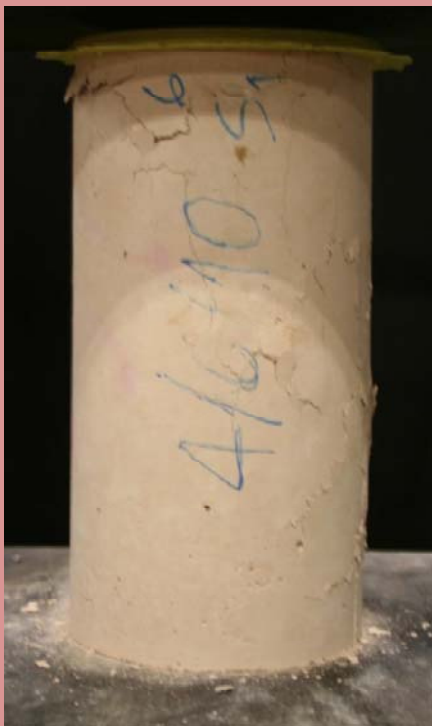
Probeta 04/06/10 (3)  
Conservación: 10 días en ambiente laboratorio + 99 días en cámara de CO<sub>2</sub>  
Tensión de rotura: 47,14 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 04/06/10 (4)  
Conservación: 109 días en ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 17,77 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 04/06/10 (5)  
Conservación: 109 días en ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 15,45 kg/cm<sup>2</sup>



Probeta 04/06/10 (6)  
Conservación: 109 días en ambiente laboratorio  
Tensión de rotura: 17,03 kg/cm<sup>2</sup>

TABLA DE VISUALIZACION TEMPORAL DE LOS DIFERENTES AMBIENTES A LOS QUE SE HAN EXPUESTO LAS PROBETAS CILINDRICAS																																													
DIAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	...	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116
28/05/2010 (1)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
28/05/2010 (2)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
28/05/2010 (3)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
28/05/2010 (4)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
28/05/2010 (5)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
28/05/2010 (6)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
28/05/2010 (7)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
31/05/2010 (1)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
31/05/2010 (2)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
31/05/2010 (3)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
31/05/2010 (4)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
31/05/2010 (5)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
31/05/2010 (6)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
31/05/2010 (7)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
01/06/2010 (1)	AMB.LAB. T.29°C H.R.50%		SUMERGIDAS EN H2O																																										
01/06/2010 (2)	AMB.LAB. T.29°C H.R.50%		SUMERGIDAS EN H2O																																										
01/06/2010 (3)	AMB.LAB. T.29°C H.R.50%		SUMERGIDAS EN H2O																																										
01/06/2010 (4)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
01/06/2010 (5)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
01/06/2010 (6)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
01/06/2010 (7)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
04/06/2010 (1)	AMB.LAB. T.29°C H.R.50%		CAMARA CO2 10%																																										
04/06/2010 (2)	AMB.LAB. T.29°C H.R.50%		CAMARA CO2 10%																																										
04/06/2010 (3)	AMB.LAB. T.29°C H.R.50%		CAMARA CO2 10%																																										
04/06/2010 (4)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
04/06/2010 (5)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	
04/06/2010 (6)	AMBIENTE LABORATORIO																										TEMP:29°C	H.R.50%																	

TABLA DE RESULTADOS ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS			
Identificación probeta	Carga (kg)	Superficie (cm <sup>2</sup> )	Tensión Kg/cm <sup>2</sup>
28/05/2010 (1)	2470	176,71	13,98
28/05/2010 (2)	2200	176,71	12,45
28/05/2010 (3)	2310	176,71	13,07
28/05/2010 (4)	2920	176,71	16,52
28/05/2010 (5)	2440	176,71	13,81
28/05/2010 (6)	2550	176,71	14,43
28/05/2010 (7)	2440	176,71	13,81
31/05/2010 (1)	2460	176,71	13,92
31/05/2010 (2)	3360	176,71	19,01
31/05/2010 (3)	3380	176,71	19,13
31/05/2010 (4)	3120	176,71	17,66
31/05/2010 (5)	3110	176,71	17,60
31/05/2010 (6)	3540	176,71	20,03
31/05/2010 (7)	3130	176,71	17,71
01/06/2010 (1)	11100	176,71	62,81
01/06/2010 (2)	10500	176,71	59,42
01/06/2010 (3)	10240	176,71	57,95
01/06/2010 (4)	2830	176,71	16,01
01/06/2010 (5)	3010	176,71	17,03
01/06/2010 (6)	3260	176,71	18,45
01/06/2010 (7)	3030	176,71	17,15
04/06/2010 (1)	9190	176,71	52,01
04/06/2010 (2)	7430	176,71	42,05
04/06/2010 (3)	8330	176,71	47,14
04/06/2010 (4)	3140	176,71	17,77
04/06/2010 (5)	2730	176,71	15,45
04/06/2010 (6)	3010	176,71	17,03

TABLA DE RESULTADOS ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS			
Identificación probeta	Carga (kg)	Superficie (cm <sup>2</sup> )	Tensión Kg/cm <sup>2</sup>
22/02/2010 (Horm.I)	1580	176,71	8,94
24/02/2010 (Horm.II)	1470	176,71	8,32
03/03/2010 (Horm.III)	1570	176,71	8,88
03/03/2010 (Horm.IV)	2320	176,71	13,13
17/03/2010 (Horm.V)	1960	176,71	11,09
17/03/2010 (Horm.VI)	1600	176,71	9,05
24/03/2010 (Horm.VII)	2470	176,71	13,98
07/05/2010 (Horm.IX)	2820	176,71	15,96



PROYECTO FINAL DE CARRERA  
INGENIERIA DE EDIFICACIÓN

***Diseño y determinación de propiedades  
de un hormigón romano***

Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (UPC)  
Octubre de 2010

**Xavier Corbella Aranda**

**Joan Bestué Valenzuela**

