

3. PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN CON ADICIÓN DE FANGO SECO

3.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En tesinas anteriores se han valorado los mecanismos de solidificación / estabilización del lodo de depuradora en una matriz de cemento Pórtland [17], [18]. Se ha visto que es posible aplicar el sistema de inertización con dicha matriz. Con ella, se garantiza la estabilización tanto física como química. Una vez comprobada la inertización, el objetivo final es explorar las posibilidades de obtención de materiales aplicables en la construcción con inclusión de fangos de depuradora de aguas residuales. Para ello, en esta tesina se intenta ver las posibilidades del hormigón en masa con adición de fango seco.

Una vez verificada la inertización del fango pasamos ya a la producción de las probetas adecuadas para cada tipo de ensayo, para ello habrá que definir un proceso de elaboración, preparación y conservación de las mismas. También señalaremos el número y tipo de probetas fabricadas para cada ensayo.

3.2. ESTUDIOS ANTERIORES EN LOS SISTEMAS FANGO SECO–CEMENTO

La incorporación de un residuo como el fango en una matriz con cemento provoca alteraciones en su comportamiento normal debido básicamente al contenido de materia orgánica, que actúa como un retardador de fraguado, y de algunos metales pesados que interfieren en las reacciones de endurecimiento.

Es básico, por eso, conocer el grado de influencia tanto para determinar la dosificación máxima recomendable de fango como para prever y controlar su comportamiento final. En ese sentido se realizaron algunos ensayos para conocer mejor el comportamiento y la evolución del sistema fango seco–cemento. Entre ellos, el inicio y final de fraguado y el estudio de productos de hidratación por difracción de rayos X.

Se comprobó que por encima del 10% de fango sobre el total de cemento el tiempo final de fraguado es muy elevado, por lo que no sería conveniente exceder este porcentaje. [17]

Contamos con los datos de principio y final de fraguado del sistema cemento–fango seco de depuradora [17], [18]. Estos resultados se obtuvieron mediante el ensayo normalizado

con la aguja de Vicat, según la UNE EN 196-3 [19] (*Tabla 3.1*). En ellos se pone de manifiesto una disminución de la velocidad de fraguado con el aumento de la adición de fango en la mezcla. Los tiempo de inicio y final de fraguado cumplen las prescripciones para los cementos (inicio después de 45 minutos y final antes de 12 horas) a excepción del sistema con el 10 % en lodo. En cuanto al inicio de fraguado el incremento de tiempo respecto el porcentaje de fango es bastante lineal, en cambio esto no es así para el final de fraguado donde el aumento de tiempo respecto el fango es mayor cada vez. Para obtener resultados comparables se ha definido como condición de trabajo común a las diferentes dosificaciones la consistencia normal.

Tabla 3.1: Tiempos de inicio y final de fraguado para el sistema cemento – fango seco.

Sistema cemento - fangos secos		
% fango	Inicio de fraguado (minutos)	Final de fraguado (minutos)
0%	135	185
1%	145	200
2,5%	175	255
5%	285	386
10%	335	1320

Tras la realización de la difracción de rayos X se observa en todas las pastas como desaparecen los anhidros (silicatos tricálcico y bicálcico, aluminato tricálcico, aluminato férrico tetracálcico y yeso) para formar los hidratos (portlandita y etringita), el resto de fases son amorfas y no se determinan por difracción de rayos X. Pero en las pastas con mayor porcentaje de fangos esta evolución es más lenta que en las mezclas con menor porcentaje, por lo tanto se corroboran los resultados de las velocidades de fraguado. Pero dicho fraguado termina sin que aparezcan nuevos componentes que podrían modificar la estructura y comportamiento del sistema. [17]

3.3. METODOLOGÍA DE PRODUCCIÓN DE PROBETAS

Para el estudio de la durabilidad de hormigones de cemento Pórtland con adición de fangos secos se han estudiado cuatro porcentajes de fango respecto al total de cemento:

- Hormigón de referencia (sin adición de fangos)
- 2,5 % de fango
- 5 % de fango
- 10 % de fango

3.3.1. Dosificación

La dosificación es un proceso con el cual se obtiene la proporción óptima entre cemento, áridos, agua y aditivos, según determinadas especificaciones.

Los componentes formadores del hormigón son:

- Fango seco de depuradora, descrito en el capítulo dos correspondiente a la caracterización de materiales utilizados.
- Áridos:
 - Arena, utilizaremos dos fracciones 0/2 y 0/5
 - Gravilla o garbancillo 5/12
 - Grava de fracción 12/18
- Cemento Pórtland, suministrado por Ciments Molins, del tipo Dragon CEM II/A-L 32,5R UNE 80-301:96/RC-97
- Aditivo Melcret PF-75
- Agua de la red de abastecimiento

La dosificación del hormigón utilizada ha sido la recomendada por el fabricante de cemento. Es una dosificación típica y bastante usada (*tabla 3.2*), y la hemos tomado como buena ya que se ha utilizado con anterioridad para otros estudios similares del departamento y podrá ser válida para posibles comparaciones.

Dicha granulometría se corresponde a un hormigón en masa con resistencia mínima a 28 días de 25 Mpa, con consistencia blanda, tamaño máximo de árido de 20 mm y que es adecuado para ambientes de tipo I, no agresivos, como por ejemplo interiores de edificios, protegidos de la intemperie [20].

Tabla 3.2: Dosificación correspondiente a un hormigón tipo HM-25/B/20/I

HORMIGÓN MASA-25/B/20/I	
MATERIAL	DOSIFICACIÓN 1m³
Arena 0/5	847 Kg
Arena 0/2	200 Kg
Melcret PF-75	1,68 L
Agua	160 L
Garbancillo 5/12	85 Kg
Grava 12/18	816 Kg
Cemento II/32,5-R	287 Kg

3.3.2. Proceso de elaboración de la mezcla

Para el proceso de elaboración de las probetas se ha seguido un proceso parecido al de la normativa UNE 83-301 [21] pero introduciendo modificaciones necesarias, con la supervisión de los técnicos del laboratorio, debido a la adición de lodos.

Una vez pesados todos los componentes, se pasa a la fase de mezcla:

- Primero introducimos el agua en la amasadora
- Seguidamente se añade el cemento
- A continuación ponemos el lodo dentro de la amasadora y se mezcla durante dos o tres minutos para obtener una pasta uniforme.
- A continuación se añaden los áridos cuya secuencia será de más fino a más grueso.
- Se deja amasando el sistema 2 o 3 minutos. Al ser la amasadora bastante grande nos servimos también de una paleta para ayudar al mezclado de todos los componentes.
- Por último añadimos el aditivo fluidificante.
- Dejamos amasando el hormigón dos o tres minutos más y luego procedemos al vertido en los moldes.

3.3.3. Mantenimiento de la consistencia en cada dosificación

Una vez amasado el hormigón comprobamos el cono de Abrams (según la norma UNE 83-313 [22]), que nos indicará el tipo de consistencia que tiene el hormigón. Para poder comparar las diferentes dosificaciones de hormigón se ha tratado de mantener constante la consistencia. Por ello, en caso de que aumentara la consistencia al aumentar el fango debido a

una posible absorción de agua por el fango, habría que introducir una mayor cantidad de agua hasta conseguir el cono de Abrams deseado.

En principio la consistencia debía de ser blanda tal como se indicaba en la dosificación dada, pero un error en el proceso de elaboración de la mezcla, introduciendo el aditivo mucho antes de lo preciso, hizo que el fluidificante no hiciera apenas efecto y que el hormigón de referencia diera un cono prácticamente cero. Por lo que teníamos consistencia seca en vez de blanda. En ese momento se decidió añadir rápidamente la mayor cantidad de agua posible consiguiendo finalmente un cono 10 (consistencia fluida). Se cogió como cantidad máxima de agua aquella que daba una relación agua / cemento de 0,65 [20], que es la máxima permitida por la normativa EHE ya que por encima de esta relación aumenta demasiado la porosidad del hormigón y empeoran mucho las propiedades físicas y la durabilidad. Al tardar bastante en concluir esta amasada probablemente se dio cierta pérdida de cono ya que una vez pasados unos 15 minutos después del mezclado se inician las reacciones y se da una pérdida de fluidez.

A partir de ese momento se decidió para las demás dosificaciones, que contenían la adición de fangos mantener la cantidad de agua y fluidificante puesta en la amasada anterior. En los demás casos ya no hubo problemas y dieron los resultados previstos tras la modificación introducida. Es decir, la consistencia fue fluida.

En la *tabla 3.3* se indica el asiento del cono de Abrams obtenido finalmente en cada dosificación.

Tabla 3.3: Asentamiento de cono de Abrams según su porcentaje de fangos.

% fango	Cono de Abrams
0 %	10
2,5 %	12
5 %	13
10 %	13

De estos resultados se ha visto que no se ha necesitado aportar más agua para mantener una consistencia constante. Seguramente esto es debido a que el fango contiene alrededor de un 15 % de humedad y no necesita captar más agua al mezclarse con los otros componentes en la amasadora como se creía en un principio.

3.3.4. Preparación de probetas y puesta en moldes

Como en todos los casos el hormigón tiene una consistencia fluida (asiento de 10 a 15 cm del cono de Abrams) se hará según la norma UNE 83-301 [21] una compactación por picado con barra.

Para la realización de los ensayos se han utilizado probetas cúbicas ($10 \times 10 \times 10$ cm) de acero. El llenado se realiza en dos capas las cuales se pican 15 veces cada una para compactarlas según norma.

3.3.5. Conservación de las probetas

Una vez fabricadas las probetas de hormigón se procede al proceso de curado, fase fundamental en todo material fabricado con ligante hidráulico.

Las probetas se colocan en la cámara húmeda a una temperatura ambiente de 20 °C y una humedad relativa mínima del 95 % hasta su desmoldado. El tiempo de desmoldado para este tipo de material no es fijo y depende de la dosificación ensayada, en nuestro caso del aumento de la proporción de fango respecto al cemento.

El tiempo mínimo para extraer las probetas del molde es 24 horas, siendo el límite de 48 horas salvo alguna excepción. Los tiempos que se han empleado han sido de 24 horas para las probetas con un 0 % y un 2,5% de fangos y de 48 horas para las probetas con un 5% y un 10%.

Estos tiempos se han deducido por la experiencia, resultados de tesinas anteriores y por el propio tacto, ya que las probetas con un mayor contenido de fango permanecían un mayor tiempo sin acabar de endurecer deformándose levemente ante cierta presión.

Una vez desmoldadas las probetas se vuelven a colocar en la cámara húmeda con las mismas condiciones ambientales que antes, continuando así su proceso de curado hasta que sean utilizadas para realizar su correspondiente ensayo.

3.3.6. Número de probetas y su nomenclatura

Para tener cierta fiabilidad en los resultados se han fabricado tres probetas para cada tipo de hormigón y ensayo.

Diferentes porcentajes de fangos: 0 %, 2,5 %, 5 % y 10 %.

Por tanto, para cada ensayo se han fabricado 12 probetas. Además de las probetas para la realización de ensayos, se han fabricado también probetas de referencia para poder comparar los resultados de una probeta sometida a un ataque de durabilidad con una probeta que haya permanecido en la cámara húmeda. Como la fabricación de las probetas se ha llevado a término en dos días distintos (debido al elevado número de probetas necesarias para la realización de los ensayos) se ha fabricado también dos series de probetas de referencia.

De este modo, tenemos un total de 84 probetas correspondientes a las necesarias para la realización de cinco ensayos (60 probetas) más 24 probetas correspondientes a las dos series de probetas de referencia.

Hemos identificado todas las probetas con una nomenclatura tipo: E – P – N.

Siendo E el ensayo que se va a relizar con esa probeta, pudiendo tomar la variable E los siguientes valores:

- A: Ciclos de humedad-sequedad con agua potable
- C: Ensayo de carbonatación
- M: Ataque por agua de mar
- P: Ensayo de estabilidad volumétrica por autoclave
- S: Ataque por sulfatos
- R: Probetas de referencia (primera serie)
- R2: Probetas de referencia (segunda serie)

La letra P hace referencia al porcentaje de fangos adicionados, que como ya hemos indicado anteriormente podrá ser 0, 2.5, 5 o 10.

Por último, la letra N nos define el número de muestra. En este caso N tomará un valor entre 1 y 3.

Una vez fabricadas las probetas, se procedió a la realización de los ensayos.