

Durabilidad del hormigón

I. Resistencia química de los cementos (*)

PABLO GARCIA DE PAREDES GAIBROIS
Lcdo. en Ciencias Químicas
I.E.T.c.e.

Método de Koch y Steinegger para el ensayo de la resistencia química de los conglomerantes hidratados frente a los sulfatos

Finalidad

Conocer en breve plazo la resistencia química de los conglomerantes bajo la forma de morteros hidratados en contacto con disoluciones acuosas de sulfatos.

Criterio

La resistencia química se aprecia a través de las resistencias mecánicas a flexotracción alcanzadas por pequeños prismas rectangulares de mortero 1:3 mantenidos sumergidos durante 56 días en disolución acuosa al 4,4 % de Na_2SO_4 .

Materiales

- El cemento que se ensaya.
- Sulfato sódico anhidro Na_2SO_4 . Reactivo para análisis.
- Arena silícica tipo I (DIN 1164).
- Arena silícica tipo II (DIN 1164).
- Agua desionizada.
- Acido sulfúrico 2 N.
- Disolución hidroalcohólica de fenolftaleína.

(*) Continuación: Materiales de Construcción, n.º 170, pág. 67.

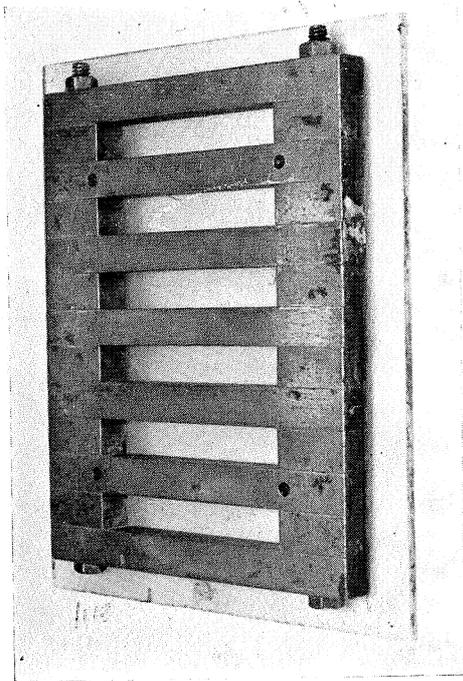


Fig. 1 A

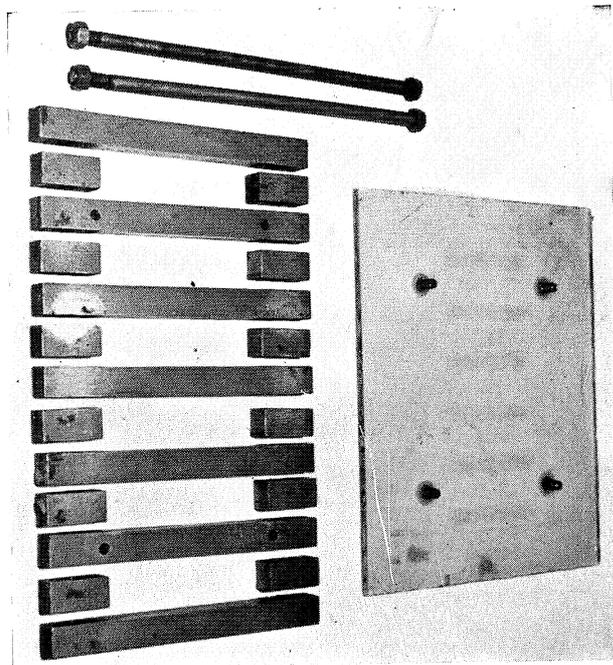


Fig. 1 B

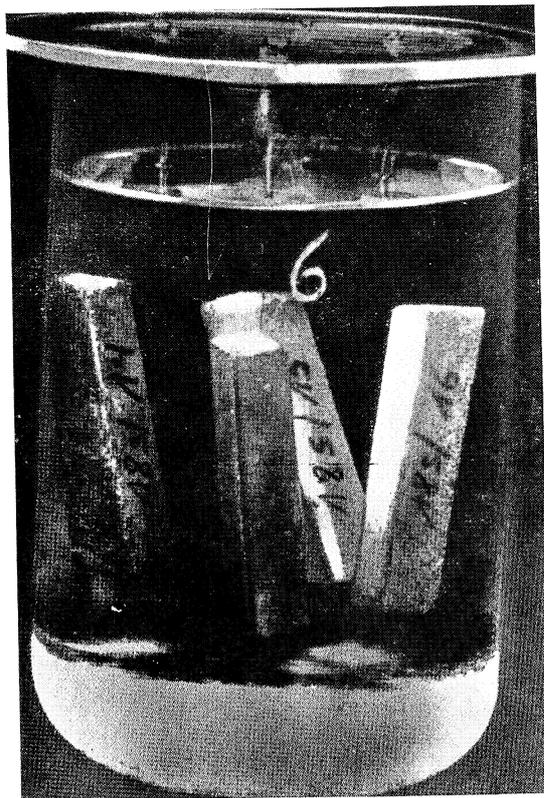


Fig. 2

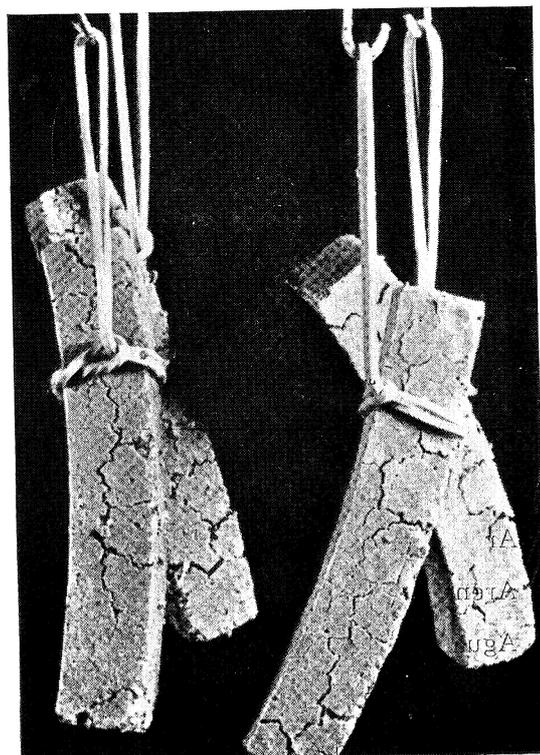


Fig. 3

Aparatos

- Material usual de laboratorio (buretas, pipetas, etc.).
- Balanza que aprecie 0,1 g.

Cámara húmeda (h.r. 80 %) 20°C.

- Moldes según figuras 1 A y 1 B.
- Cubeta de goma para amasar.
- Pisón.

Prensa capaz de romper a flexotracción los pequeños prismas.

- Placas circulares de plástico provistas de 4 orificios.
- Cintas de goma.

Preparación de los prismas

Los prismas pequeños de $1 \times 1 \times 6$ cm se preparan según la norma DIN 1164.

Para un molde de cuatro prismas se pesan 15 g de cemento y se mezclan en seco con 15 g de arena fina (I) y 30 g de arena gruesa (II) en la vasija de goma para amasar; la operación se prolonga durante 2 minutos. Seguidamente se añaden lentamente 9 ml de agua desionizada utilizando una bureta graduada en 1/10 ml; la cantidad de agua corresponde a una relación agua/cemento igual a 0,6. Se amasa el conjunto durante 2 minutos.

Los moldes se llenan en dos capas; cada una debe compactarse con 20 golpes del pisón. Se recomienda llevar este trabajo en una estancia cuya humedad relativa sea elevada (80 %) 20°C. Los moldes, una vez llenos, deberán recubrirse con una tela metálica abombada y, además, envolverse con un paño húmedo. Al cabo de dos horas el mortero excedente se quita, enrasando y nivelando con la parte superior del molde. De nuevo se recubre el molde con un paño húmedo. Después de 24 horas se extraen los prismas. Si, pasado este plazo, los prismas no estuviesen suficientemente endurecidos, se aplaza la extracción otras 24 horas.

Cantidad de prismas

Para un cemento se preparan 28 prismas. De ellos 12 se destinan al ataque con la disolución de sulfato; 12 se conservan sumergidos en agua desionizada —son los “testigos”—, y los cuatro restantes se rompen al comenzar el ensayo, a los 21 días.

Preparación del ácido sulfúrico 2 N

Al ácido sulfúrico 2 N se añade una cantidad de Na_2SO_4 igual a la de la disolución agresiva. En una probeta de 1 l se disuelven en 500 ml de agua destilada 44,1 g de Na_2SO_4 y a continuación se añaden 98,1 g de H_2SO_4 ; una vez fría la disolución se completa hasta el litro con agua desionizada.

Preparación de la disolución agresiva

Para cada litro de disolución se disuelven en 1 l de agua desionizada 44,1 g de Na_2SO_4 . Se utiliza el sulfato anhidro reactivo; el sulfato seco retiene pequeñas cantidades de agua; debe desecarse en estufa a constancia de peso a 110°C . Es conveniente comprobar la concentración de la disolución en SO_4^{2-} .

Ensayo de la resistencia química

Cada cuatro prismas se cuelgan con unas cintas de goma (fig. 3) de una placa de plástico pasando las gomas por los orificios de la placa. Para el ataque se vierte en un vaso de 1 l de capacidad una cantidad tal de la disolución de sulfato (o de agua desionizada para los testigos) que, al tapar el vaso con la placa, queden los prismas totalmente sumergidos.

Al iniciarse el ensayo se rompen a flexotracción cuatro prismas.

Semanalmente se añade al vaso, con la disolución de sulfato, unas gotas de fenolftaleína; la disolución se colorea en rojo debida a la alcalinización producida por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y el NaOH , en las reacciones del ataque. Para neutralizar la disolución se utiliza el ácido sulfúrico 2 N preparado. Durante la neutralización se deben extraer los prismas protegiéndolos del CO_2 ambiental.

Al final de cada plazo de 15-56-96 días de contacto con la disolución se extraen cuatro prismas y después de enjuagar con agua desionizada y secarlos superficialmente, se rompen a flexotracción. Durante el ensayo no se cambia la disolución agresiva.

Al final de cada plazo se extraen, del agua desionizada, cuatro prismas "testigos" y se rompen a flexotracción.

El cociente de dividir el valor de la resistencia a flexotracción alcanzado por los prismas conservados en la disolución agresiva, por el valor de la resistencia alcanzada por los "testigos" contemporáneos, es el índice de resistencia química:

$$\frac{\text{Resistencia alcanzada por los prismas atacados}}{\text{Resistencia alcanzada por los "testigos"}} = R_n$$

Calificación

Son resistentes a los sulfatos los conglomerantes cuyo R_{s6} alcance un valor aproximadamente superior a 0,7.

Modificaciones

El Sr. Fernández París (Jefe de la Sección de Química de INTEMAC) para evitar el retraso que impone la lenta introducción de los líquidos en los prismas extrae el aire contenido en el mortero. Para ello coloca en un vaso pequeño los prismas y los recubre con el líquido en que luego van a ser introducidos; el vaso con los prismas lo coloca en el inte-

rior de un desecador con llave (desprovisto de desecante) y extrae el aire; cuando cesa el desprendimiento de burbujas, hace entrar el aire que empuja el líquido dentro de los poros.

En la División de Durabilidad del IETCC se sustituye la arena DIN por arena silícica con granos comprendidos entre 1 y 1,5 mm.

La compactación se realiza en la mesa de sacudidas de Abrams.

Los vasos se sustituyen por frascos de plástico provistos de tapa roscada para evitar la carbonatación y la evaporación.

Además del sulfato sódico, se utilizan sulfatos alcalinos y alcalino-térreos, agua de mar artificial y, cuando se quiere averiguar la agresividad de un líquido, es éste el que se usa en lugar de las disoluciones.

También se utiliza, para la calificación, el estado físico externo de los prismas.

Ensayo de la sulfato-durabilidad de los conglomerantes, utilizando pequeños cubos de mortero

Prof. MARKESTAD

Finalidad

Conocer, en plazo relativamente corto, la sulfato-durabilidad de los conglomerantes.

Criterio

La resistencia a la compresión que alcanzan las probetas cúbicas de mortero, de 12,7 mm de arista, mantenidas en disoluciones de sulfatos amónico o magnésico.

Moldes

De bronce; cada molde puede contener ocho cubos; la base del molde es de cristal lo que permite comprobar si se produce segregación. El molde y su base deberán engrasarse con lubricante neutro (aceite de tocino).

Balanza

Los materiales se pesarán en una balanza analítica sensible al miligramo.

Vibrador

De tipo "mesa", que funcione con una frecuencia de 6.000 ciclos por minuto.

Cámaras de conservación

Cajas de material no atacable (plástico), con buen cierre. Se las mantendrá en ambiente exterior a temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$.

Prensa de roturas

La velocidad de carga será aproximadamente de 72 kp/cm^2 por minuto. Accionadas por motor eléctrico.

Utensilios para el amasado

Placa de acero de 22 cm de lado. Espátulas en acero, con 15 cm de longitud de hoja. Bureta de 50 ml divididos en décimas.

Agua para el amasado

Destilada o desionizada.

Reactivos

Sulfato amónico. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Sulfato magnésico $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ambos en la calidad "Reactivo para análisis".

Arena

Arena silícea, exenta de materiales perjudiciales y con la granulometría siguiente:

Tamiz BS N.º	7	14	25	52	100
Luz de malla mm	2,411	1,405	0,599	0,295	0,152
Tanto por ciento que pasa	100	60	45	35	15

Preparación de las disoluciones

Las disoluciones se prepararán disolviendo en agua destilada o desionizada la cantidad de sulfato necesaria para alcanzar una concentración de 5 gramos de SO_3 en litro. Esta concentración deberá comprobarse mediante el análisis.

Preparación de las probetas

Conviene preparar amasadas de ocho probetas. Los materiales se pesarán en la balanza analítica. Se pesarán para los ocho cubos, 13,333 gramos de cemento y una cantidad triple de arena.

Durante 1 minuto se sacuden el cemento y la arena colocados en un recipiente cerrado con objeto de mezclarlos íntimamente; después de esta operación, se completará aún la mezcla sirviéndose de las espátulas.

El agua se adiciona con el auxilio de la bureta; la cantidad necesaria para los ocho cubos es 6,6 ml. De esta forma el valor del coeficiente agua/cemento será 0,495.

Se amasa, durante 3 minutos la mezcla húmeda, utilizando las espátulas y, a continuación, se vierte en los moldes. Estos con su contenido se colocan en la mesa vibratoria y se conduce la vibración de forma que durante 15 segundos la aceleración sea de 2 gramos y seguidamente, durante 45 segundos, valga 8 gramos. Se traslada el molde a la cámara húmeda (90 a 100 % h.r. a 21°C) en la que se conserva durante 48 horas.

Es aconsejable preparar seis amasadas seguidas y los 48 cubos, una vez desmoldados, se trasladan a una cámara de conservación que se llena con agua desionizada y así se las conserva durante 7 días.

Al finalizar este plazo, se trasladan 24 cubos a otras cámaras de conservación en las cuales se vierte la disolución del sulfato (ya sea el amónico o el magnésico) procurando que el nivel superior del líquido quede a 20 cm de la cara superior de los cubos. Los otros 24 cubos permanecen en el agua para servir de testigos.

Deben prepararse tantos conjuntos de 48 cubos cuantos sean los plazos al final de los cuales se desee ensayar la resistencia de los mismos a la compresión. Las disoluciones, y el agua de los testigos, se renovarán semanalmente durante las primeras 5 semanas y con menos frecuencia en los plazos sucesivos.

Generalmente los plazos para la ruptura de las probetas y sus correspondientes testigos suelen ser:

Semanas:	1	2	4	6	8	10	12
----------	---	---	---	---	---	----	----

La relación entre los valores encontrados para la resistencia a la compresión de los cubos conservados en la disolución de sulfato y sus coetáneos conservados en agua, se puede considerar como un índice de la sulfato-durabilidad del conglomerante a la edad correspondiente.

Es necesario, a fin de evitar grandes errores, contar con una mesa vibratoria adecuada y observar minuciosamente las normas que se han dado para la ejecución del ensayo.

Investigación del ataque químico de líquidos agresivos al cemento hidratado y endurecido

P. SCHIMMELWITZ

Finalidad

Observar el proceso químico del ataque sufrido por el cemento hidratado y endurecido en contacto con líquidos agresivos.

El autor se propuso investigar la resistencia química del cemento, después de su endurecimiento, reducido a pequeñísimos granos de pasta sin pulverizarla, pues los pequeños trozos que se pueden obtener al pulverizar, presentan zonas de cemento aún sin hidratar y esto desfigura el proceso que se desea conocer. Con el modo de proceder que él expone, se obtienen granos piramidales con base de 3×3 mm y altura de 1,5 mm, reproducibles y que por la gran superficie de ataque reducen el tiempo del ensayo.

El ataque se realiza por percolación de los líquidos agresivos a través de una columna rellena de granos de cemento. Los procesos se investigan a través del análisis químico de los líquidos recogidos después del ataque.

Materiales

- El cemento que se ensaya.
- Agua desionizada.
- Disoluciones acuosas (por ejemplo de sulfatos alcalinos, etc.).
- Líquidos agresivos (por ejemplo aguas selenitosas, aguas de mar, etc.).

Aparatos

- Material usual para análisis químicos.
- Material usual para amasar el cemento.
- Moldes para obtener los granos piramidales.
- Cámara húmeda 95 % h.r. a 20°C.
- Columna para la percolación (fig. 1).

Preparación de los granos

Molde

El autor preparó una lámina de plástico endurecido en frío, obtenida como “negativo” de una plancha de caucho cuya superficie estaba formada por pirámides que tenían 3×3 mm de base y 1,5 mm de altura.

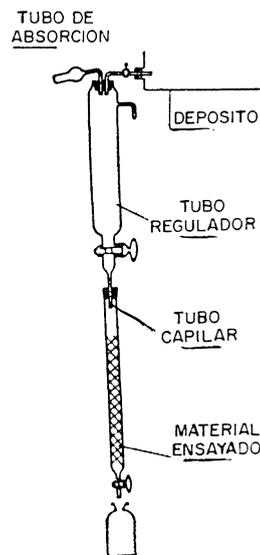


Fig. 1

La relación entre la superficie de los granos obtenidos y su volumen es ochenta veces mayor que la existente en un cubo de 100 mm de arista. El número de granos que con el molde utilizado se preparaban fue de 4.000, y su peso de 27 gramos.

Pasta

Preparada amasando el cemento con agua desionizada. La relación agua/cemento igual a 0,35.

Preparación y curado de los gránulos

La pasta se vierte sobre el molde, se enrasa y, el conjunto, se conserva durante 24 horas en la cámara húmeda a 20°C y 95 % h.r.

Finalizado este plazo, los granos fácilmente se extraen del molde y, de nuevo, se conservan en la cámara hasta el momento de su ataque; generalmente 28 días, aunque se pueden ensayar a 1-7-28-250 días.

Estudio de las reacciones

Los gránulos se vierten en la parte del aparato destinada al ataque, con una altura de 25 cm y se compactan ligeramente con unos golpes.

En el depósito del aparato se colocan 10 l del líquido agresivo y se regula el gasto de líquido hasta obtener un paso de 1,5 ml por minuto, aproximadamente 2 l en la jornada.

Los extractos se recogen a intervalos correspondientes a 1/2 o hasta 1 minuto al principio; más adelante con intervalos de 10 minutos.

El análisis químico revela los cambios producidos que permiten formular las hipotéticas reacciones del ataque. La temperatura debe mantenerse a 20°C.

Algunas disoluciones acuosas colmatan prontamente la columna impidiendo la percolación. En estos casos el estudio de las reacciones se lleva a cabo colocando los gránulos piramidales en frascos de plástico con capacidad de 1 l y vertiendo en ellos las disoluciones agresivas. Bien cerrados los frascos se colocan en algún artificio que permita agitarlos a razón de treinta vueltas por minuto.

Después de 1-3-6 días se extraen los líquidos y se analizan. La temperatura deberá mantenerse a 20°C.

Objeto

Conocer la resistencia que los conglomerantes, incluso los siderúrgicos, poseen frente al ataque por sulfato.

Criterio

Las variaciones de volumen experimentadas, a) por la pasta pura, b) por el mortero, de un conglomerante enriquecido con yeso y conservado, respectivamente, bajo agua o en cámara húmeda.

ENSAYOS CON PASTA PURA

Materiales

Piedra de yeso molida hasta alcanzar un residuo del 5 % sobre el tamiz de 88 micras de luz; el contenido en CaSO_4 , debe conocerse.

Aparatos

- Tanques para la conservación en cualquier material resistente al contacto con disolución saturada y alcalina de CaSO_4 .
- Agujas de Le Chatelier.
- Placas de cristal para las agujas.
- Sonda de Tejmayer (B. O. E. n.º 109 Apto. 2.41).
- Utensilios usuales para el amasado del conglomerante.
- Reglilla para la medida de la separación de las agujas, dividida en milímetros.

Preparación del conglomerante

Se mezcla en seco, íntimamente, un peso del conglomerante, y la mitad de ese peso piedra de yeso molida.

Preparación de la pasta

Se preparará una pasta, amasando el conglomerante enriquecido, con el 25 % de su peso de agua.

Ejecución del ensayo

Con la pasta obtenida según el párrafo anterior, se llenarán 10 agujas de Le Chatelier y se conservarán durante 24 horas en cámara húmeda (B.O.E. n.º 109 Apto. 2.53). Finalizado este plazo se realizará la primera medida de la separación de las agujas.

A continuación se sumergen en agua, cuya temperatura se mantendrá a $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Las medidas sucesivas de la separación entre las agujas se realizarán a los 3, 7, 14, 28, 90, 180, etc., días.

Se calculará el valor medio de las variaciones observadas, así como su desviación específica.

Paralelamente es conveniente realizar este mismo ensayo con un conglomerante de reconocida resistencia química.

Los valores medios obtenidos, tanto del conglomerante resistente, como del conglomerante que se ensaya, se pueden expresar en cuadros numéricos o en gráficos.

Nota: Si se dispone de poca cantidad del conglomerante, el número de agujas utilizado se puede disminuir, aunque con ello se pierda seguridad, ya que en cierto modo se trata de un ensayo cualitativo.

Ensayos con mortero

Se realizan con prismas similares a los utilizados en el método ASTM C 452-64 (Expansión potencial de morteros de cemento portland expuestos a los sulfatos), en los cuales el conglomerante utilizado es el enriquecido según se ha indicado.

La conservación y la obtención de resultados se realiza según el citado método ASTM C 452-64.

Ensayo de la durabilidad de hormigones, según W. GACA

Finalidad

Apreciar, en el laboratorio, la durabilidad del hormigón sometido, simultáneamente, a la heladura y al deshielo en contacto con agentes químicos agresivos.

Criterio aplicado

Las variaciones de las resistencias a flexión y a compresión alcanzadas por probetas de $4 \times 4 \times 16$ cm, así como las variaciones morfológicas de las mismas sometidas durante cierto tiempo a la influencia conjunta de los cambios térmicos y de agentes químicos agresivos.

Materiales

- El conglomerante que se ensaya.
- Aridos: Arena silícica, libre de impurezas, con 5 % de polvo y 35 % de granos menores de 2 mm. Tamaño máximo 10 mm. Granulometría continua.
- Agua desionizada.
- Sulfato magnésico $MgSO_4$.
- Agua de mar artificial.

Aparatos

- Los usuales para amasar y vibrar hormigones.
- Frigoríficos con límites de $-20^{\circ}C$ y $+18^{\circ}C$.
- Cámara húmeda (60 % h.r. a $20^{\circ}C$).
- Recipientes para contener las probetas y las disoluciones.
- Moldes prismáticos para probetas de $4 \times 4 \times 16$ cm.
- Material usual de laboratorio para la preparación y el análisis de las disoluciones agresivas.
- Prensa para romper a flexión y a compresión las probetas.

Agresivos

Disolución acuosa al 2 % ponderal, de $MgSO_4$.

Agua de mar artificial, concentrada a cinco veces; $NaCl = 67,5 \%$. $MgCl_2 = 15,5 \%$.
 $MgSO_4 = 13,5 \%$. $CaSO_4 = 3,5 \%$.

Probetas

Prismas rectangulares de $4 \times 4 \times 16$ cm de hormigón.

Dosificación del hormigón: 350 kg/m^3 . Aridos: 1.900 kg/m^3 . $a/c = 0,46$. Consistencia plástica. Compactación por vibración.

Modo de operar

El ensayo consiste en someter a 25 ciclos de heladura y deshielo (-2°C , $+18^\circ\text{C}$) a los prismas sumergidos en disolución de MgSO_4 y de agua de mar artificial y romper a flexotracción y a compresión. Los valores se comparan con los alcanzados por probetas mantenidas durante el mismo tiempo sumergidas en agua desionizada. Se ensayan probetas de 7 días de edad y probetas de 28 días de edad.

Paralelamente al ensayo de resistencias, se anota el estado superficial de las probetas.

Número de probetas

Se preparan seis para la disolución agresiva MgSO_4 ; seis para el agua de mar artificial y seis para agua desionizada testigos. Este número es para cada edad. El amasado y enmoldado en forma usual.

Ensayo con edad de 7 días

Veinticuatro horas después de desenmoldadas se exponen las probetas durante cuatro días al aire húmedo (60 % h.r. 20°C). A continuación se colocan en las disoluciones agresivas y se las somete sin extraerlas a 25 ciclos de heladura y deshielo; cada ciclo de 24 horas. El ensayo se considera terminado a los 32 días contados desde la extracción de los moldes. Finalmente se rompen a flexotracción y a compresión. A fines de comparación seis probetas, después de extraídas del molde, se exponen durante 5 días al aire húmedo (60 % h.r. 20°C) y a continuación se mantienen sumergidas en agua desionizada durante 32 días ($t = 18^\circ\text{C}$). Terminado ese plazo se rompen a flexotracción y a compresión; los valores alcanzados se consideran como 100 a fines de comparación.

Ensayo con edad de 28 días

Veinticuatro horas después de extraídas de los moldes, las probetas se exponen al aire húmedo (60 % h.r. 20°C) durante 5 días y 20 días más al aire seco. A continuación se las sumerge en las disoluciones agresivas y 2 días después se las somete a 25 ciclos de heladura y deshielo como en el ensayo de 7 días. Terminado este plazo se rompen a flexotracción y a compresión. Para fines de comparación otras probetas se las conserva al aire seco durante 26 días y, cuando finalice este plazo, se las sumerge en agua desionizada hasta que alcancen 53 días de edad, entonces se rompen a flexotracción y compresión. Los valores alcanzados se consideran como 100 a fines de comparación.

Al final de cada ciclo se observa y anota el aspecto externo de las probetas calificándolo según la siguiente escala:

- 0 = Sin alteración.
- 1 = Ligero sedimento en los recipientes.
- 2 = Pequeños astillamientos en los vértices.
- 3 = Pequeñas grietas.
- 4 = Grietas importantes (en el agua de mar reblandecimiento).
- 5 = Desintegración más acusada.
- 6 = Roturas.
- 7 = Desintegración total.

Los ensayos pueden realizarse con inmersión total o a media altura.

Calificación

Una pérdida de resistencias, evaluada por comparación, del diez al veinte por ciento significa una buena durabilidad.

(Aunque el autor no lo indica, parece que la velocidad de cambio térmico debe ser de un grado cada hora y treinta y cinco minutos).