

CAPITULO 7

PRUEBA DE REACCION ALCALINA DE AGREGADOS

por

Masamitsu Arai, Kouji Mano,
Susumu Kumahara, Kouichi Suzuki

1. Introducción

Se le llama "reacción alcalina" de agregados al conjunto de fenómenos de degradación del concreto ocasionados por la reacción química entre algunos minerales contenidos en los agregados y las sustancias alcalinas del concreto, cuyo producto absorbe agua y genera expansión. En este momento, en Japón se considera un problema la reacción que ocurre entre minerales silíceos y la alcalinidad del concreto, que se denomina "reacción álcali - sílice" (RAS). Hay que tener claro que en este caso, los álcalis son sodio y potasio, y no hidróxido de calcio $\{Ca(OH)_2\}$, que se forma con la hidratación del cemento.

En este texto, se presenta "las pruebas de reactividad entre álcali y sílice (el método químico y el método de barra de mortero)", basándose en los métodos determinados en el Proyecto Provisional del Ministerio de Construcción y en JIS, dando énfasis a los puntos de observación y de cuidado.

2. Resumen de los métodos de la prueba

Como métodos de prueba de RAS, tanto el Proyecto Provisional del Ministerio de Construcción como las JIS, establecen dos: el método químico y el método de barra de mortero. El método químico pretende identificar la reactividad potencial de los agregados rápidamente por el análisis químico, mientras que el método de barra de mortero intenta fabricar barras de mortero con los agregados, para conocer la reactividad potencial de los agregados midiendo su tasa de expansión.

3. Partición, trituración y formulación de la muestra

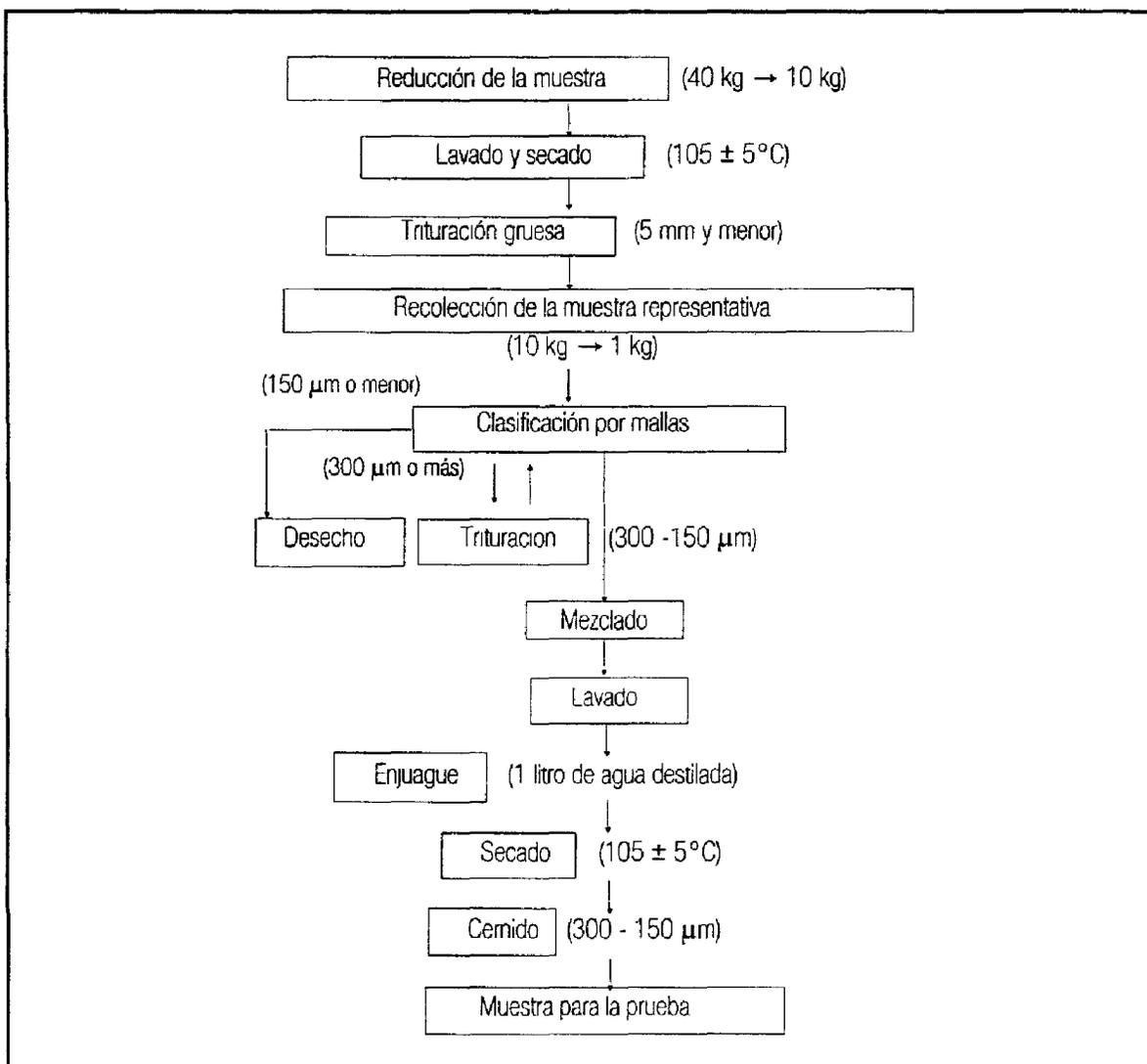
1) Método químico

Las muestras de agregados que se utilizan para la prueba deben ser compuestas de agregados no utilizados previamente o de los agregados en el concreto no fraguado. Se recolectan aproximadamente 40 kg de agregado grueso, y 40 kg de agregado fino. Cuando se pretende probar grava y arena triturada que se sacaron de una misma cantera, se prueba la arena triturada según el Proyecto del Ministerio de Construcción, mientras que JIS establece que la grava se prueba en su finura típica, o sea con el agregado grueso de 20 mm a 5 mm, y que el resultado es aplicable a la arena. Aunque las expresiones difieren entre el Proyecto del Ministerio y JIS, los dos textos dicen que en caso de utilizar las mismas rocas originales, no es necesario probar la grava y la arena, sino uno de estos dos.

En el diagrama 1 se muestran los procedimientos de partición, trituración y ajuste de la muestra.

En este caso, una muestra de 40 kg aproximadamente se reduce a 10 kg por el método de cuarteo o por un divisor de muestras, y luego se le aplica una trituración primaria hasta que los granos tengan un tamaño igual o menor que 5 mm. Se mezcla bien y se reduce otra vez hasta 1 kg. Las partículas gruesas de 300 μm o más, se colocan repetidas veces en el molino de discos, para que toda la muestra tenga una finura de 300 μm o menor. Luego, la finura de partículas se ajusta entre 300 y 150 μm , para tener la muestra lista para la prueba.

Diagrama 1



Lo esencial es recolectar una muestra original de unos 40 kg, que se va a dividir posteriormente, de tal manera que represente fielmente el total de agregados. La reducción de la muestra se realiza con relativa facilidad, si se utiliza el método de cuarteo cuando se reduce de 40 a 10 kg, y un divisor cuando se reduce de 10 a 1 kg, logrando así una muestra representativa.

Cuando se trata de agregados naturales, como grava y arena de río, grava y arena de suelo o grava y arena de cantera, como estos materiales naturales contienen una gran variedad de minerales de rocas, es necesario tener un cuidado especial para que la proporción de diferentes rocas en la muestra coincidan con la proporción que tiene la totalidad de los agregados.

Cuando se trituran agregados naturales que contienen una gran variedad de rocas, es importante reducir el diámetro de granos en forma gradual, ya que las distintas rocas significan diferentes grados de dificultad para triturar. Es necesario evitar, hasta donde sea posible, las partículas demasiado pequeñas de menos de 150 μm , para que la proporción de la mezcla de diferentes especies de rocas no varíe antes y después de la trituración.

2) Método de barra de mortero

En cuanto a la muestra de agregados que se utiliza para la prueba, se recolectan unos 40 kg de muestra representativa, igual que en el caso del método químico. Cuando se hace la prueba por el método de barra de mortero, después del método químico, hay que utilizar la misma muestra, por lo que se usa el sobrante de la misma (alrededor de 30 kg). El procedimiento de partición, trituración y ajuste de la muestra para el método de barra de mortero se describe en el diagrama 2.

Este procedimiento se puede resumir de la siguiente manera: primero se recolectan unos 40 kg de agregado fino o grueso, se divide y se hace 10 kg, se coloca en una serie de molinos para triturar y se clasifica en 5 categorías por el tamaño de partículas que va de 4.75 mm a 150 μm . Para tener la muestra para la prueba se mezclan agregados de cada una de las categorías granulares de acuerdo con el porcentaje en peso que aparece en el cuadro 1.

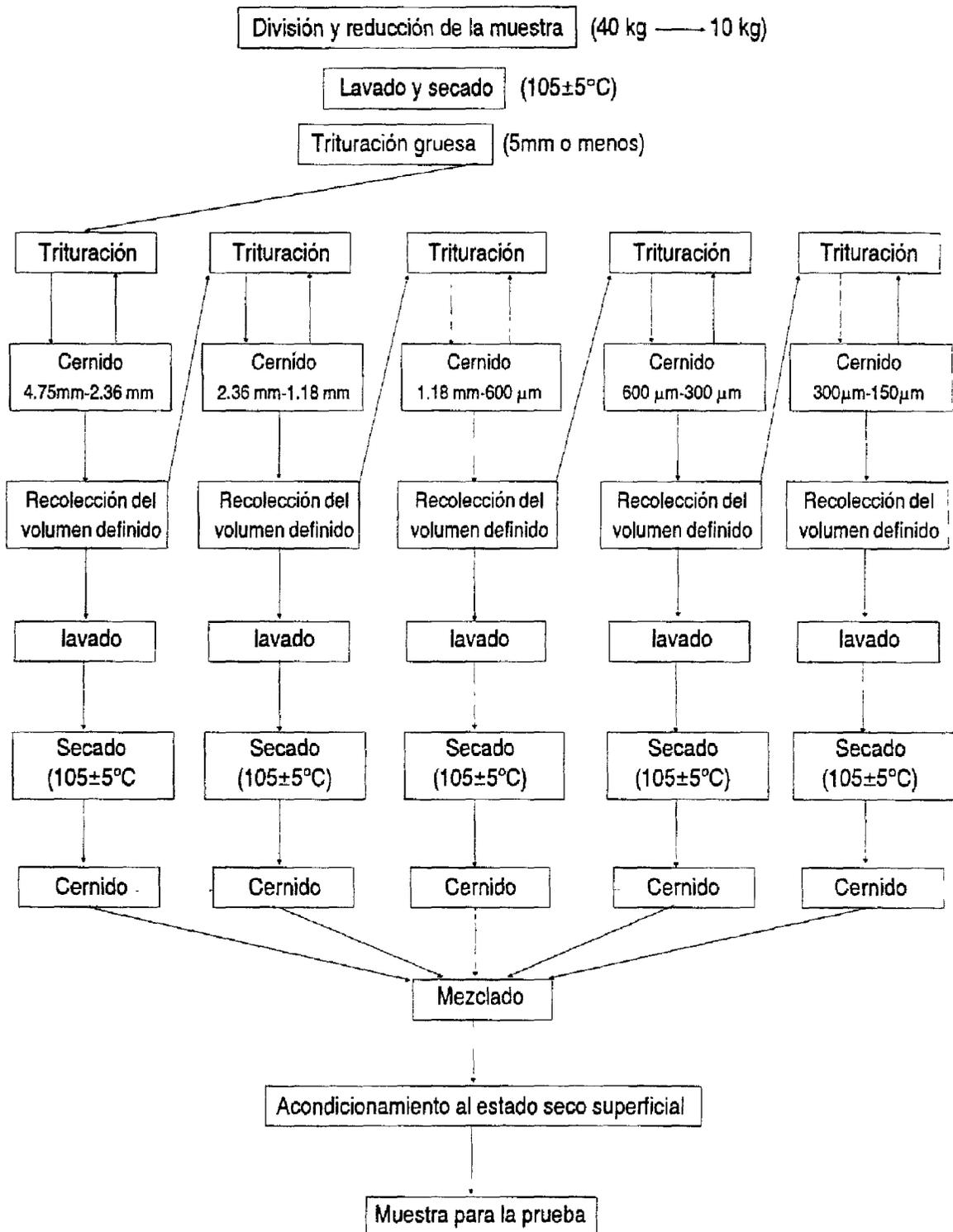
Aquí lo importante es no tratar de reducir el diámetro de partículas en una vez sino gradualmente, repitiendo la trituración y clasificación por cribado. Sobre todo, cuando se manejan agregados naturales, es muy importante triturar gradualmente, para mezclar materiales típicos en cada categoría de finura.

Se considera que existe un punto pésimo de RAS por la finura y la proporción de la mezcla de agregados reactivos, por lo que es muy importante tomar todas las precauciones posibles sobre los puntos arriba mencionados para que la muestra triturada represente fielmente la totalidad de los agregados.

Cuadro 1
Finura de la muestra para el método de barra de mortero

Medida nominal de mallas		Porcentaje de la masa
Pasando por	Quedando en	
4.75 mm	2.36 mm	10
2.36 mm	1.18 mm	25
1.18 mm	600 μm	25
600 μm	300 μm	25
300 μm	150 μm	15

Diagrama 2
Procedimientos para la elaboración de la muestra para
el método de barra de mortero

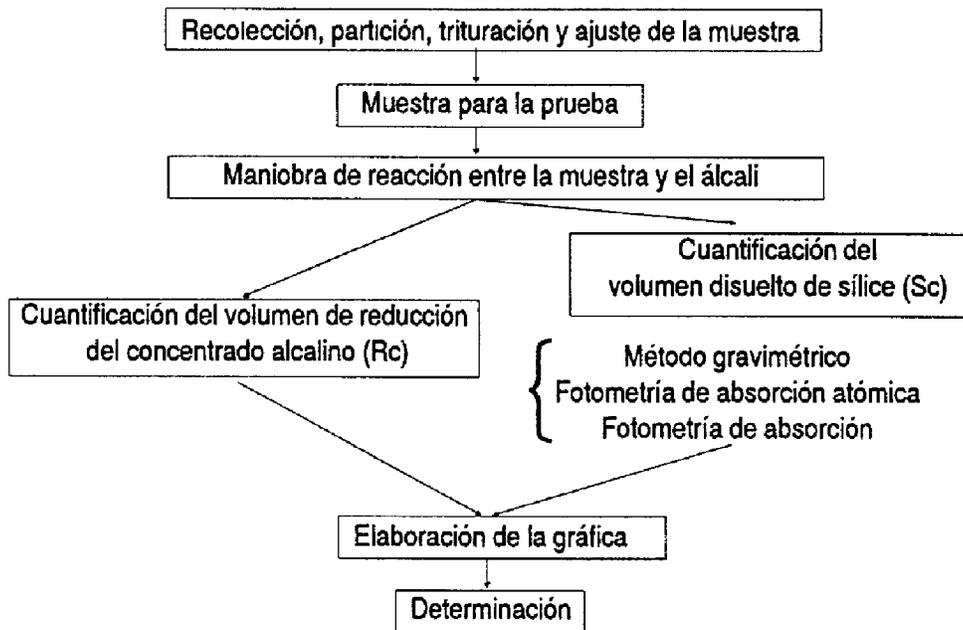


4. Método químico

La prueba por el método químico se realiza según los procedimientos mostrados en el diagrama 3. En una gráfica se marca la relación entre la reducción del concentrado alcalino (R_c) y el volumen del sílice disuelto (S_c) en la solución original, y por el área en que caen estos puntos se juzga su inocuidad, nocividad potencial o nocividad.

El agregado juzgado como inocuo en esta prueba no tiene problemas para ser utilizado en la elaboración del concreto. El agregado juzgado nocivo o potencialmente nocivo, debe ser sometido a prueba por el método de barra de mortero que se menciona en 5., para juzgar su aptitud como material para el concreto, o hay que tomar algunas medidas de control establecidas para inhibir la reacción antes de utilizarlo.

Diagrama 3
Procedimiento de la prueba por método químico



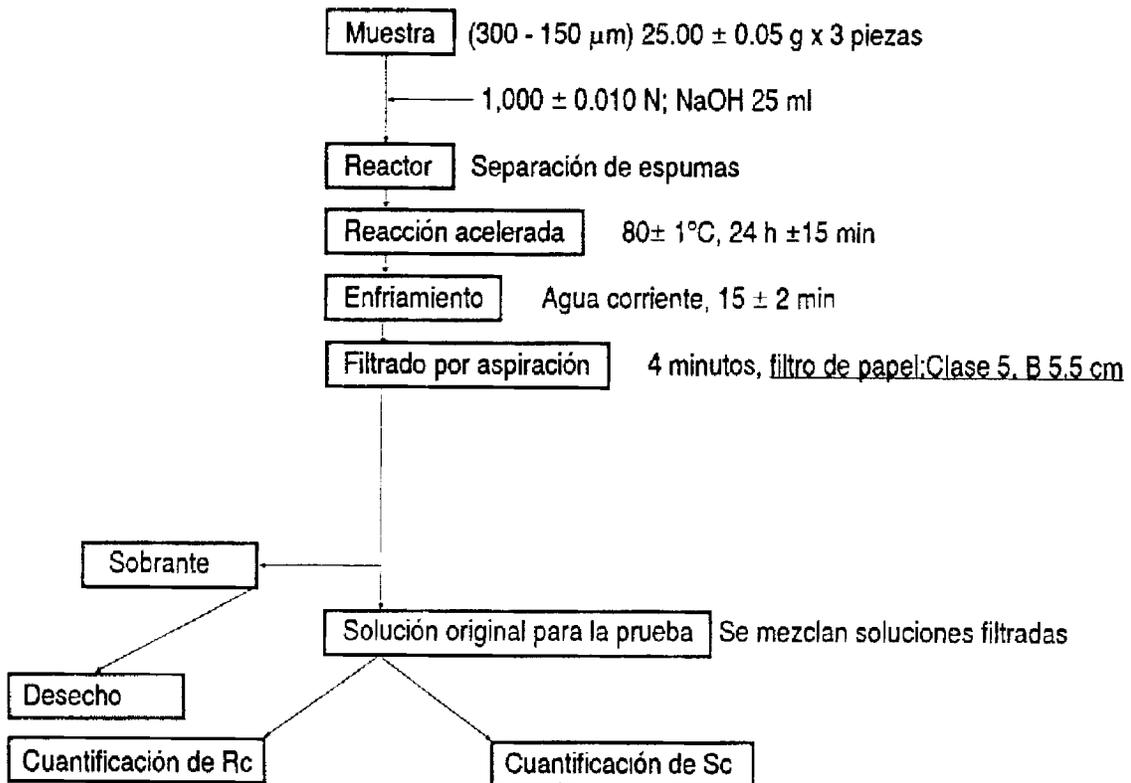
Es inconveniente aplicar el método químico a la caliza o a las rocas que contienen cal, por lo que es necesario realizar un estudio mineralógico antes de aplicar este método. En general, la caliza o las rocas calizas no producen la reacción álcali - sílice, ya que contienen muy pocos minerales silíceos. Sin embargo, se dice que a veces provocan la reacción de rocas de carbonato alcalino que se considera como una de las reacciones alcalinas de agregados. Esta reacción consiste en la producción de carbonato alcalino como resultado de la reacción entre la dolomita contenida en la caliza y la sustancia alcalina contenida en el cemento. Este carbonato alcalino reacciona con hidróxido de calcio, produciendo sulfo-aluminato de calcio, que expande el concreto generando fisu-

ras. Para conocer esta reactividad de las rocas de carbonato alcalino, existe la prueba mencionada en ASTM C-586 (método de cilindro de roca).

1) Maniobra de la reacción del álcali con la muestra

El diagrama 4 muestra los procedimientos de maniobra de la reacción entre el álcali y la muestra. El punto más importante que hay que cuidar en esta maniobra de reacción es el tiempo y la temperatura en el momento de la reacción acelerada, los cuales deben ser controlados estrictamente según la norma. El grado de reacción entre el álcali y la muestra varía grandemente de acuerdo con el tiempo y la temperatura de reacción, e influye sobre la reducción del contenido alcalino (Rc) y el volumen disuelto de sílice (Sc). Por lo tanto es necesario mantener las condiciones dentro de los rangos estipulados, y sin fluctuaciones hasta donde sea posible. En el cuadro 2 se muestra un ejemplo de las variaciones provocadas en el resultado por el cambio de la temperatura de la reacción.

Diagrama 4
Maniobra de la reacción entre el álcali y la muestra



Cuadro 2. Un ejemplo de los impactos de la temperatura de la reacción sobre el resultado de la prueba. (m mol/l)

Muestra	A		B		C		D	
Temperatura de la tina (°C)	Rc	Sc	Rc	Sc	Rc	Sc	Rc	Sc
79.2	120	428	121	479	50	97	65	775
80.0	123	459	119	515	52	105	64	785
80.8	141	450	139	512	63	109	89	786

Nota: Texto para las conferencias sobre el método de prueba de reactividad potencial de los agregados (método químico). Noviembre, 1985, Asociación de Cementeros.

2) Método de cuantificación del volumen de reducción del contenido alcalino (Rc)

El procedimiento de cuantificación del volumen de reducción del contenido alcalino se muestra en el diagrama 5. En este procedimiento de cuantificación de Rc, lo más importante es evitar, hasta donde sea posible, que entre en la solución el dióxido de carbono existente en el aire. Para esto es necesario terminar en un corto tiempo la maniobra de neutralización por titulación con ácido clorhídrico.

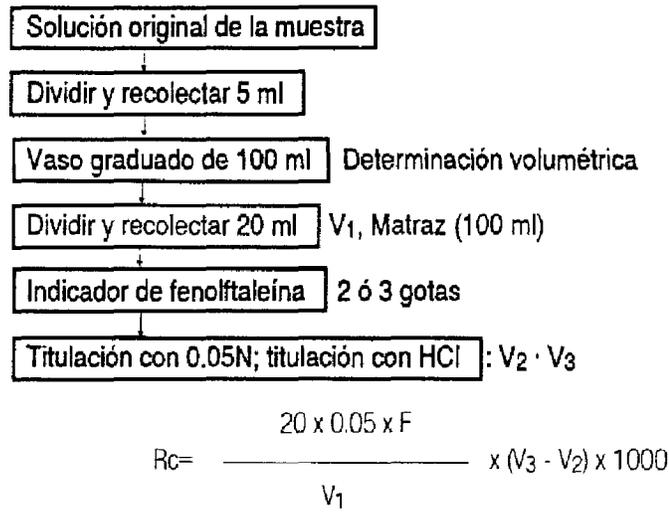
En otras palabras, si la titulación tarda mucho por pretender cuidar la precisión, el valor de Rc va a aumentar por la carbonatación de la solución de la muestra por el dióxido de carbono que existe en el aire. Por lo tanto, para acortar el tiempo necesario para una serie de maniobras, es conveniente hacer una neutralización preliminar. Esta para saber el valor cercano para llegar al consumo final, para que en la titulación formal pueda agregar el ácido clorhídrico rápidamente hasta el valor aproximado, para concentrar el cuidado en la etapa final de precisión.

Unos cinco minutos después de la terminación del procedimiento, a veces la solución vuelve a tomar el color rojo; esto se debe a la hidrosilis del silicato de sodio, por lo que se puede ignorar.

3) Método de cuantificación del sílice disuelto (Sc)

Para la cuantificación del sílice disuelto, existen tres métodos establecidos: el método gravimétrico, el método fotométrico de absorción atómica y el método fotométrico de absorción. En este texto, se explicará el método gravimétrico y el método fotométrico de absorción atómica, que son los métodos que utilizamos en este laboratorio.

Diagrama 5
Método de cuantificación del volumen de reducción
de la concentración alcalina (Rc)



F: Factor de 0.05N y de HCl

V₃: volumen de HCl necesario para la titulación de la prueba de control (ml)

a. Método gravimétrico

En el diagrama 6, se indican los procedimientos del método gravimétrico.

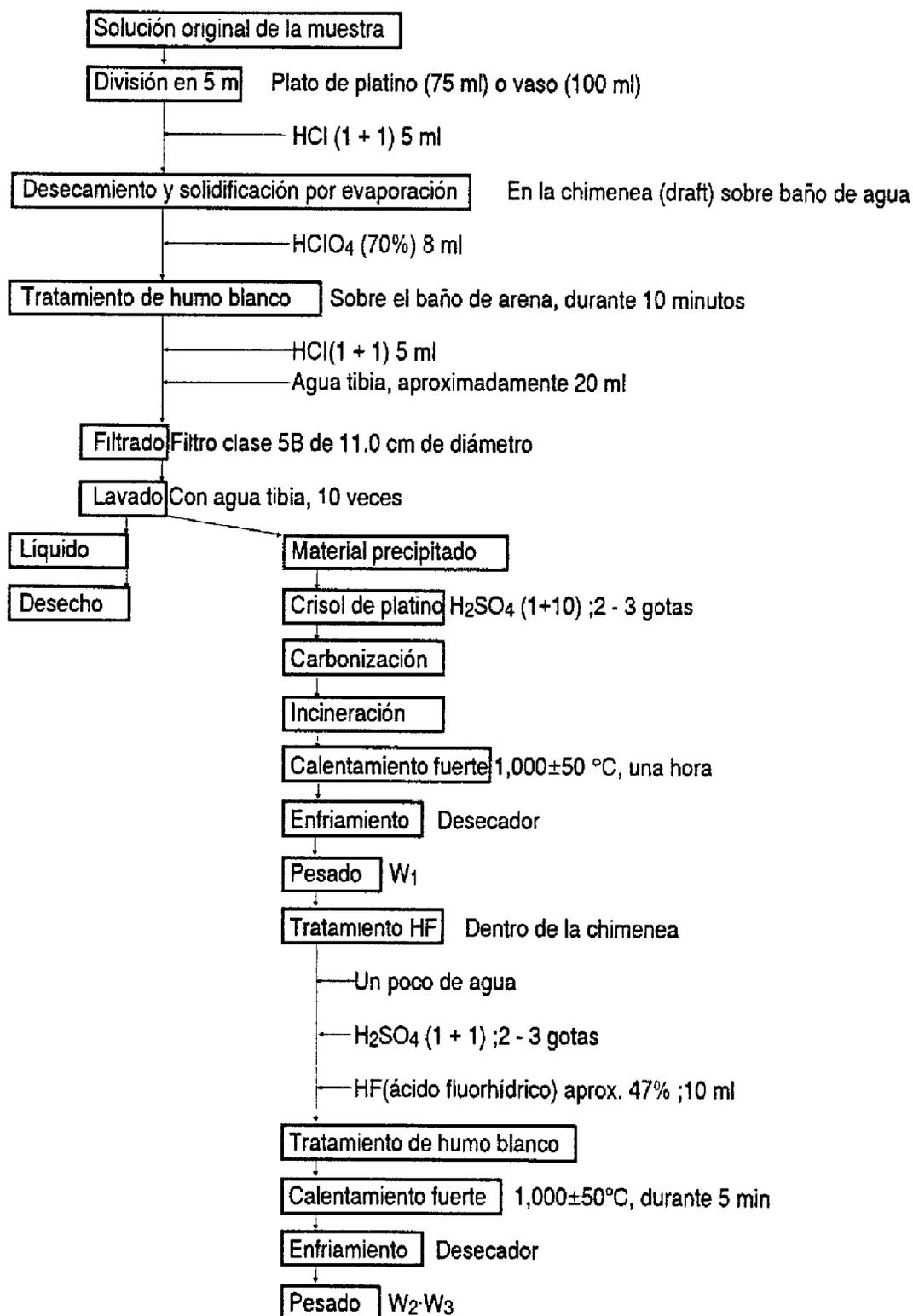
Uno de los puntos de mayor cuidado en este método es lavar suficientemente el filtro con agua tibia. Si este lavado es insuficiente y queda ácido perclórico sobre el papel del filtro y se puede dispersar el material precipitado en el proceso de incineración por calentamiento, afectando el valor de Sc y generando resultados incorrectos.

Por lo tanto, hay que aplastar muy bien las masas gelatinosas que están en el plato de platino o en el vaso con una barra de vidrio antes de filtrar. El sílice en estado gelatinoso es relativamente fácil de disolver en el agua; si se lava con agua tibia las veces establecidas (10 veces), se diluirá sin grandes problemas.

El segundo punto de cuidado es incinerar el filtro lentamente, durante bastante tiempo. Si se calienta con fuego fuerte apresuradamente antes de que la incineración del filtro sea completa, se producen carburos de color negro que aumentan la masa del material precipitado, e imposibilitan que se logre el valor correcto de Sc. Por lo tanto, cuando se calienta a fuego fuerte, hay que aumentar el calor lentamente y aplicarlo al conjunto del filtro y el material precipitado, carbonizándolos sin que se generen flamas. Se sigue aumentando el calor hasta que el conjunto se incinere, y finalmente se le aplica una temperatura de 1,000±50°C durante una hora. El precipitado de sílice fuertemente calentado absorbe la humedad, por lo que es necesario pesarlo en corto tiempo. Para meter y sacar el desecador, hay que tener cuidado para que no se disperse por el movimiento del aire. También es importante mantener a un mismo nivel el tiempo de enfriamiento en el desecador, desde el punto de vista de la repetitividad de la prueba. Cuando se traslada al crisol de platino, es conveniente utilizar alicates con puntas cubiertas de platino, para no rayar el crisol.

Diagrama 6

Método de cuantificación del volumen de sílice disuelto (S_c) (Método gravimétrico)



$$S_c = 3,330 \times (W_1 - (W_2 - W_3))$$

W₃: Masa que se compensará por el resultado de la prueba en blanco. (g)

b. Método fotométrico de absorción atómica.

El principio del método fotométrico de absorción atómica es el siguiente:

Por las flamas de alta temperatura, los elementos objeto de análisis contenidos en la solución se convierten en átomos flotantes. Cuando por esta flama pasa la luz, los átomos excitados absorben luces de cierta frecuencia. Al medir el grado de absorción y de las frecuencias de las luces absorbidas, se puede saber la concentración de los elementos objeto de análisis contenidos en la solución. En este método, es importantes manejar con cuidado el espectrofotómetro de absorción atómica.

En primer lugar, hay que conocer muy bien las características de la curva de trabajo del silicio para cuantificarlo con precisión. Por lo general, las curvas de trabajo del fotómetro de absorción atómica son rectas en las densidades bajas, y tienden a curvarse en las densidades altas por diversas causas. Por lo tanto, hay que medir dentro del rango de línea recta en la práctica; se debe diluir la solución, si es necesario, para que la concentración correspondiente quede dentro del rango de la línea recta.

Por otra parte, las condiciones óptimas establecidas al inicio del análisis pueden ir cambiando paulatinamente por el uso continuo del fotómetro durante largo tiempo. Cuando se trata de analizar muchas muestras, es necesario revisar de vez en cuando las curvas de trabajo, mientras se realice el análisis.

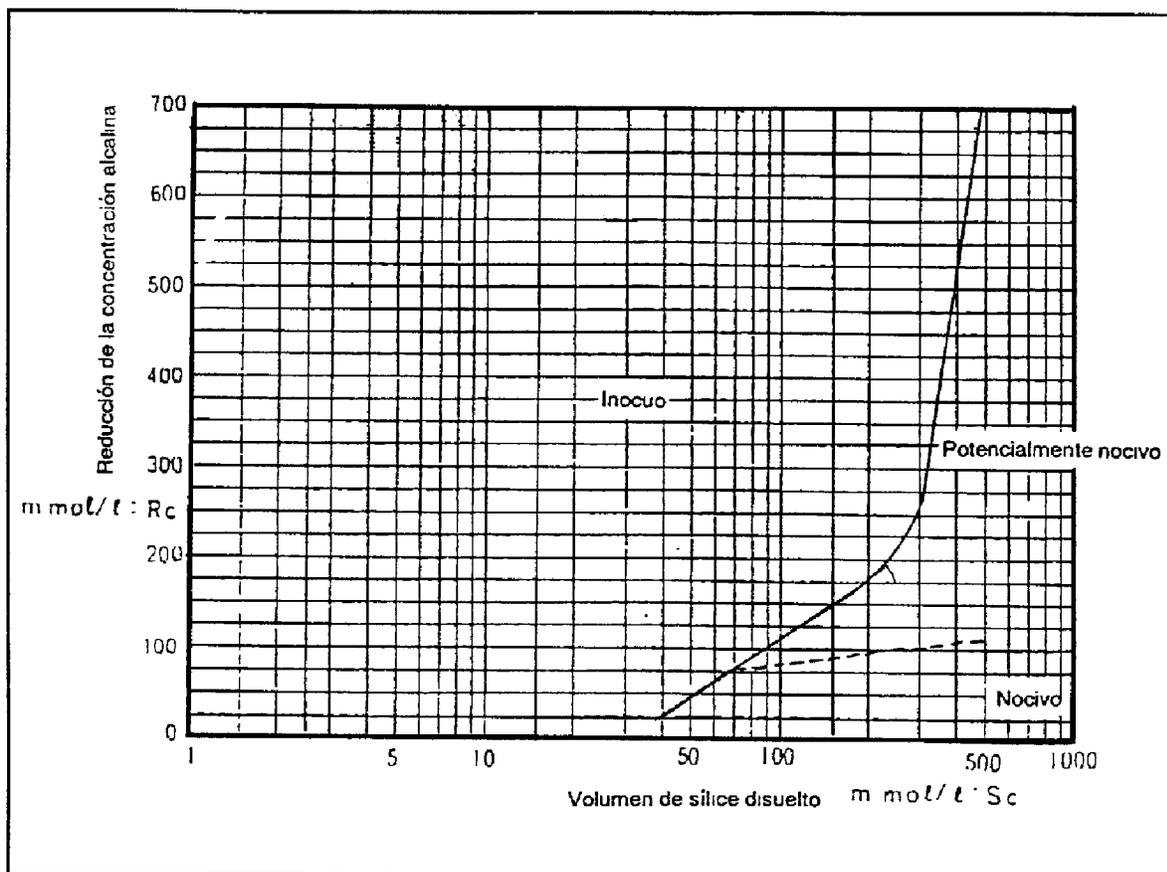
Para la medición se utilizan gases de acetileno y de dióxido de nitrógeno, por lo que a veces se acumulan carburos alrededor de las ranuras impidiendo que se logren los valores precisos de S_c . Es necesario eliminar bien los carburos pegados a los accesorios.

4) Determinación

Los resultados de la prueba de reactividad álcali-sílice se demuestran con los puntos de la gráfica de determinación 7, correspondiente a los valores promedios de R_c y S_c . Se juzga si un agregado es inocuo, potencialmente dañino o dañino, dependiendo del área en que se sitúan los puntos.

Si alguno de los tres valores medidos cae en una área diferente a otros, se recomienda repetir la prueba. Cuando el punto graficado cae sobre la línea divisoria entre un área y otra, se juzga sobre la base del sentido de mayor seguridad (por ejemplo, si queda sobre la línea divisoria entre el área inocua y la dañina, se interpretará como dañino).

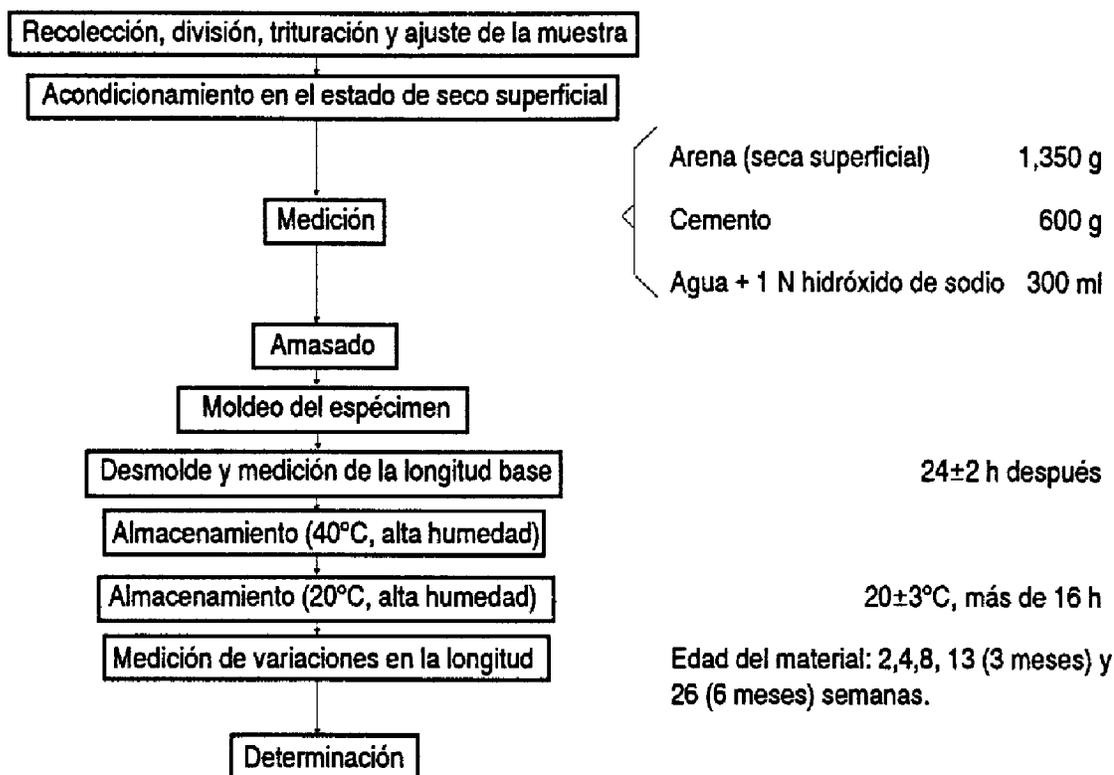
Gráfica 7
Gráfica de determinación del grado de nocividad de los agregados



5. Método de barra de mortero

Se elaboran barras de mortero siguiendo los procedimientos señalados en el diagrama 8. Se conservan en condiciones de reacción aceleradas de alta temperatura y de alta humedad, para medir luego la tasa de expansión de las barras para juzgar la reactividad potencial de agregados-muestra. Los agregados determinados dañinos en esta prueba tienen una reactividad potencial, por lo que es necesario tomar las medidas de inhibición previstas en el Proyecto Provincial del Ministerio de Construcción o en JIS.

Diagrama 8
Procedimiento de la prueba por el método de barra de mortero



Los puntos de cuidado para cada procedimiento son los siguientes:

1) Medición

La formulación del mortero se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3
Formulación del mortero

	Cantidad	Relación (en masa)
Arena (seca superficial)	1,350 g	Arena: cemento=1:2.25
Cemento	600 g	Relación agua-cemento=50%
Agua + solución en Agua de NaOH	300 ml	Contenido alcalino 1.2%

En este procedimiento, lo más importante es utilizar cemento con poco contenido alcalino, y lo ajusta al nivel de 1.2% de contenido alcalino (R₂O) agregándole la solución acuática de 1N-NaOH en cantidades calculadas por la siguiente fórmula:

i. Para ajustar 600 g de cemento con $R_2O=0.5\%$ y convertirlo en cemento con $R_2O=1.2\%$

$$600 \times \frac{(1.2 - 0.5)}{100} = 4.20 \text{g} \text{ Se requiere } 4.20 \text{g de } Na_2O$$

ii. Para calcular el volumen equivalente de NaOH al 4.20 g de Na_2O ;

$$4.20 \times \frac{NaOH}{(Na_2O/2)} = 4.20 \times \frac{40.0}{31.0} = 5.42 \text{ g}$$

iii. Para convertir 5.42 g de NaOH en 1N-NaOH (40.0 g NaOH/litro):

$$\frac{5.42}{40.0} = 0.136 \text{ litros} \quad 5.42 \text{ g de NaOH corresponde a } 0.136 \text{ litros de } 1N\text{-NaOH}$$

Por lo tanto, 136 ml de agua de amasado debe ser sustituida por 1N-NaOH.

El segundo punto es cuidar de que los agregados finos (en el estado de seco superficial) no se sequen en el momento de la medición. Esto es muy importante para mantener constante la relación agua-cemento del mortero amasado; cuando se quiere utilizar arena que no esté en estado de seco superficial, se debe medir su contenido de agua para calcular la diferencia con el factor de absorción, con el objeto de compensar el volumen de agua.

Antes de la medición, es conveniente mantener todos los materiales en una cámara de temperatura constante, de 20°C , por lo menos durante 24 horas, para homogeneizar la temperatura de los materiales utilizados.

2) Preparación del molde

En la preparación de los moldes, es importantes confirmar la longitud efectiva entre los discos para el deformímetro mecánico. Cuando se colocan los discos al molde, si los orificios del molde están llenos de polvo o si existe aire atrapado adentro, los discos no entran completamente y la longitud efectiva varía, ocasionando que la tasa de expansión de barra de mortero no se calcule correctamente. En el cuadro 4 se muestra la relación entre la longitud efectiva entre discos y la tasa de expansión. De acuerdo con este cuadro, si la longitud efectiva de calibre es de 139.4 a 140.7 mm no va a haber diferencias en el resultado del cálculo de la tasa de expansión.

En nuestro laboratorio, determinamos la profundidad de los orificios del molde según el disco utilizado, para que la longitud efectiva entre discos quede en 140 mm.

Los discos que se venden en el mercado difieren en su longitud dependiendo de su tipo, por lo que es importante utilizar la longitud efectiva real entre discos en el cálculo de la tasa de expansión.

Cuadro 4
Relación entre la longitud efectiva entre discos y la tasa de expansión.

Longitud efectiva (mm)	Tasa de expansión en % cuando la variación de longitud es de 0.140 mm
139.3	0.100502 → 0.101
139.4	0.1004 → 0.100
139.5	0.1004 → 0.100
140.0	0.100
140.5	0.0996 → 0.100
140.6	0.0996 → 0.100
140.7	0.099502 → 0.100
140.8	0.0994 → 0.099

3) Amasado

En el proceso de mezclado es importante mantener la relación agua-cemento del mortero amasado, por lo que hay que utilizar los instrumentos de prueba como cuchara y recipiente de amasado, sin agua, quitándoles el agua previamente con tela seca.

La solución acuosa de IN-NaOH debe estar mezclada totalmente antes de utilizarla. Es conveniente medir el valor de flujo del mortero siguiendo los procedimientos de JIS R 5201 (Método de pruebas físicas del cemento) para tenerlo como una referencia, para comprobar el tipo de agregados utilizados.

4) Moldeo del espécimen

Hay que cuidar que el molde se llene totalmente de mortero amasado; se tiende a acumular burbujas de aire alrededor de los discos por lo tanto, hay que cuidar que el mortero se distribuya bien en estas partes, sobre todo, utilizando un cuchillo de cemento o una varilla compactadora de diámetro reducido.

Cuatro a cinco horas después de la colocación, se quita la parte sobrante del mortero con una cuchara de albañil, y se aplanan la superficie superior cuidando que no se dañe el espécimen. Si este acabado de la superficie superior se realiza antes de tiempo, a veces se presenta una sedimentación del mortero posteriormente. Por otra parte, si transcurre demasiado tiempo antes del acabado, se daña el espécimen frecuentemente y no se aplanan bien la superficie.

En el método especificado en JIS, se menciona que se puede reducir el agua del amasado ligeramente cuando existe la posibilidad de separación de materiales en el

proceso de moldeo por el mortero demasiado blando, pero en realidad no se presentan estos casos.

5) *Desmolde y longitud de base*

El desmolde se realiza después de 24 ± 2 h de la colocación del mortero en el molde. Hay que tener cuidado de que el espécimen no reciba impactos en el momento de desmolde, sobre todo no hay que ejercer presión sobre los discos. Cuando se ejercen fuerzas sobre los discos, se afecta la adherencia de éstos con el mortero, lo que puede causar errores en la medición. Es conveniente utilizar desmoldadores comerciales (para moldes de tres series), ya que posibilitan un desmolde muy fácil sin que se fuercen los discos. Para evitar que se seque el espécimen, hasta donde sea posible, el desmolde y la medición de la longitud base deben ser realizados en el tiempo más corto posible, y terminada la medición, inmediatamente guardar el espécimen en el contenedor de almacenamiento.

En nuestro laboratorio, los especímenes se colocan en el contenedor de almacenamiento que se mantiene a 20°C , inmediatamente después del desmolde, y se sacan uno por uno para la medición, regresándolos inmediatamente al contenedor después de la medición. En el momento de la medición, es necesario comprobar que las puntas de los discos estén totalmente limpias y sin adherencias.

6) *Almacenamiento y medición*

El primer cuidado que se debe tener en el proceso de almacenamiento es controlar suficientemente la humedad y la temperatura del contenedor. La expansión de barras de mortero es vulnerable a las condiciones del almacenamiento (temperatura y humedad); cuando se presentan fluctuaciones en la humedad en el contenedor, se pueden producir variaciones en la tasa de expansión de cada uno de los especímenes, causando problemas de precisión en el resultado de la prueba. Por lo tanto, es necesario medir de antemano la distribución de la temperatura y la humedad dentro del contenedor, y se debe modificar el contenedor si se observan variaciones considerables. No se deben almacenar especímenes con diferentes fechas de moldeo en un mismo contenedor.

En segundo lugar, hay que tener cuidado para que los especímenes no tengan contacto con agua dentro del contenedor. En nuestro laboratorio, se utiliza una caja de cloruro de vinilo con una gasa con agua pegada en la pared interior; para evitar que caigan gotas del techo de la caja sobre los especímenes por el exceso de agua, se le agrega con atomizador, una cantidad muy pequeña de agua a la gasa, en el momento de iniciar el almacenamiento. En el fondo de la caja se coloca el agua, pero cuidamos que no sea excesivo su volumen porque si hay demasiada agua, los especímenes se mojan al inclinarse ligeramente la caja. Si el espécimen se pone en contacto directo con el agua, los iones de Na, K y Si pueden diluirse en el agua por presión osmótica, afectando la precisión de la tasa de expansión.

El tercer punto está en relación con los hongos que se generan dentro del contenedor. Los hongos, dependiendo de su especie, pueden ocasionar enfermedades graves, como asma u otros tipos de alergia, por lo que hay que tener mucho cuidado para que no se generen hongos en el contenedor. Por lo general, la producción de hongos tiene

relación con cinco condiciones: a) temperatura: 20 - 40°C, b) humedad, c) oxígeno, d) valor PH: 4 - 8, e) nutrientes. Si eliminamos una de estas cinco condiciones, podemos evitar que se generen hongos. En nuestro laboratorio, anteriormente se utilizaba fieltro pegado en la pared interior, pero se observaba la producción de hongos por ricos nutrientes que contenía el fieltro; sustituimos el fieltro por gasa, tela de menor contenido de nutrientes (e), y ya no se observa la generación de hongos en el contenedor.

En el momento de la medición de variaciones de longitud, hay que cuidar los siguientes tres puntos:

i) que se mida en el tiempo más corto posible, para evitar que se seque el espécimen;

ii) que se mida siempre a un lado determinado para abajo y el otro lado para arriba;

iii) que se invierta la dirección longitudinal y el lugar de colocación del espécimen en el momento de cada almacenamiento.

En el momento de la medición de variaciones de longitud, se registran también las anomalías observadas, como la flexión de la barra, la existencia de burbujas, fisuras en la superficie y los lixiviados gelatinosos o manchas.

Cuadro 5

1.	Nombre de la prueba	Prueba de reactividad álcali-sílice de agregados (Método químico).
2.	Objetivo de la prueba	Probar la reactividad álcali-sílice de los agregados utilizados para la elaboración del concreto.
3.	Muestra	Muestra para la prueba de alrededor de 500 g de 300 a 150 μm , recolectada de una muestra original de aprox. 40 kg, después de la división, reducción, trituración y ajuste.
4. Método de prueba	Resumen	Se pone a reaccionar la muestra con el álcali, y se mide el volumen de reducción en la densidad alcalina (Rc) y el volumen del sílice disuelto (Sc) de la solución original de la muestra. Los resultados de la medición se registran en una gráfica de determinación, para determinar químicamente la reactividad álcali-sílice del agregado en un corto tiempo.
	Normas aplicables	1) Proyecto Provisional del Ministerio de Construcción [Prueba de reactividad álcali-sílice de agregados (Método químico)]. 2) JIS A 5308, Anexo 7 [Método de prueba de reactividad álcali-sílice de agregados (Método químico)].

	Instrumentos de la prueba	<p>a) <i>Dispositivos e instrumentos para el ajuste de la muestra:</i></p> <p>Un juego de trituradores gruesos y finos, mallas, secadores.</p> <p>b) <i>Dispositivos e instrumentos para la prueba de reactividad álcali-sílice:</i></p> <p>Balanza química, reactor, tina de temperatura constante, baño de agua, baño de arena, espectrofotómetro fotoeléctrico, fotómetro de absorción atómica, horno eléctrico, un juego de aparatos para análisis crisol de platino, desecador y filtro de succión.</p> <p>c) <i>Reactivos:</i></p> <p>Solución estándar de 1N hidróxido de sodio, solución estándar de 0.05N ácido clorhídrico, ácido perclórico (70%), ácido fluorhídrico (aprox. 47%), ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, indicador de fenolftaleína (solución con un 1% de etanol), solución estándar de sílice (Si 1,000 ppm) o solución original de sílice (10 m mol SiO₂ /l).</p>
4. Método de prueba	Detalles del método	<p>1) Procedimiento de reacción de álcali y la muestra: ver el diagrama 4.</p> <p>2) Método de cuantificación del volumen de reducción de la densidad alcalina: ver el diagrama 5.</p> <p>i) Cálculo del resultado:</p> $Rc = \frac{20 \times 0.05 \times F}{V_1} \times (V_3 - V_2) \times 1,000$ <p>Donde Rc: Volumen de reducción de la densidad alcalina (m mol/l)</p> <p>V₁: Volumen recolectado de la solución diluida de la muestra que se utilizó en la titulación (ml)</p> <p>V₂: Volumen de la solución estándar de ácido clorhídrico de 0.05N requerido para la titulación de la solución diluida de la muestra (ml)</p> <p>V₃: Volumen de la solución estándar de ácido clorhídrico de 0.05N requerido para la titulación de la solución diluida para la prueba en blanco (blank test) (ml).</p> <p>F: Factor de la solución estándar de ácido clorhídrico de 0.05N.</p>

Detalles del método

Generalmente, V_1 es 20 ml, por lo que podemos simplificar la fórmula anterior:

$$R_c = 50 \times F \times (V_3 - V_2)$$

3) Método de cuantificación del volumen disuelto de sílice (Sc):

a. Método gravimétrico: ver diagrama 6

i) Cálculo del resultado:

$$Sc = 3,330 \times \{W_1 - (W_2 - W_3)\}$$

Donde Sc : Volumen disuelto de sílice (m mol/l)

W_1 : masa medida por primera vez (g)

W_2 : Masa medida por segunda vez (g)

W_3 : Masa por complementarse mediante la prueba en blanco (g)

b. Método de fotómetro de absorción atómica.

i) Elaboración de la solución estándar: Se dividen y se diluyen las cantidades necesarias de la solución estándar de sílice.

ii) Elaboración de la curva de trabajo: establecer las condiciones óptimas del fotómetro de absorción atómica con las flamas de alta temperatura de gas de acetileno y dióxido de nitrógeno. Medir la absorción de cada solución estándar a una frecuencia de 251.6nm, para elaborar la curva de trabajo.

iii) Medición: Medir la absorción de las soluciones de muestra apropiadamente diluidas en las mismas condiciones utilizadas para la elaboración de la curva de trabajo.

iv). Cálculo de los resultados: los resultados se calculan de acuerdo con la fórmula (1) cuando se utiliza la solución estándar original de sílice (10 m mol SiO_2/l), y de acuerdo con la fórmula (2) cuando se utiliza la solución estándar de sílice comercial (Si 1,000 ppm).

$$Sc = 20 \times n \times c \quad (1)$$

$$Sc = 20 \times n \times A \times \frac{1}{2800} \quad (2)$$

4. Método de prueba	Detalles del método	<p>Donde S_c: Volumen disuelto de sílice (m mol/l)</p> <p>n: Tasa de dilución</p> <p>c: Contenido de sílice obtenido de la curva de trabajo (SiO_2 m mol/l)</p> <p>A: Contenido de sílice obtenido de la curva de trabajo (Si mg/l)</p>
	Normas aplicables	<p>1) Proyecto Provisional del Ministerio de Construcción [Prueba de reactividad álcali-sílice de agregados (Método químico)].</p> <p>2) JIS A 5308 Anexo 7 [Método de prueba de reactividad álcali-sílice de agregados (Método químico)].</p>
5. Método de evaluación	Criterios de determinación	En la gráfica de determinación (gráfica 7), se grafican los valores promedios del R_c y S_c . Se determina si los agregados son inocuos, potencialmente nocivos o nocivos, de acuerdo con el área donde se encuentran los puntos graficados.
	6. Expresión de resultados	<p>1) Tipo de tamaño y lugar de procedencia de los agregados.</p> <p>2) Los resultados de la medición de R_c y S_c y los valores medios correspondientes.</p> <p>3) Determinación de los resultados y gráfica de determinación con los puntos graficados.</p>
7. Consideración		Los materiales juzgados como potencialmente nocivos o nocivos, serán sometidos a la prueba por el método de barra de mortero para llegar a la conclusión final.

Cuadro 6

1. Nombre de la prueba	Prueba de reactividad álcali-sílice de agregados (Método de barra de mortero)
2. Objetivo de la prueba	Conocer la reactividad álcali-sílice potencial de los agregados utilizados para la elaboración del concreto.
3. Especímenes	<p>1) Medidas: 4 x 4 x 16 cm</p> <p>2) Cantidad: tres especímenes.</p>

4. Método de prueba	Resumen	Determinar la reactividad álcali-sílice de los agregados, por medio de la medición de las variaciones en la longitud de las barras de mortero.
	Normas aplicables	1) Proyecto Provisional del Ministerio de Construcción [Prueba de reactividad álcali-sílice de agregados (Método de barra mortero)]. 2) JIS A 5308, Anexo 8 [Método de la prueba de reactividad álcali-sílice de agregados (Método de barra mortero)].
	Instrumentos para la prueba y dispositivos de medición	Molino, mallas, balanza o báscula, mezclador de mortero, instrumentos para medir las variaciones de longitud, cámara de temperatura constante (20°C y 40°C), contenedor de almacenamiento.
	Condiciones en el momento de la prueba	Moldeo de mortero y medición de variaciones de longitud: 20±3°C de temperatura. Condiciones de almacenamiento de las barras de mortero: 40±2°C de temperatura, humedad igual o mayor al 95%.
	Detalles de la prueba	1) División, trituración y ajuste de la muestra. 2) Acondicionamiento en el estado de seco superficial. 3) Medición: arena (seca superficial) 1,350 g, cemento (con bajo contenido alcalino) 600 g, solución acuosa de agua + NaOH 300 ml. 4) Amasado: Cemento + arena, 30 segundos → agua+NaOH, 30 segundos → se amasa durante 120 segundos batiendo el material del fondo del recipiente hacia arriba con una cuchara. 5) Moldeo: Se coloca el mortero en el molde en dos capas. Después de cinco horas, se aplana la superficie superior. 6) Curado inicial: El molde se coloca en una caja húmeda y se cubre con una tela mojada. 7) Desmolde: Deben transcurrir 24 ± 2 h desde la colocación del mortero hasta el desmolde. 8) Medición de la longitud base: Se mide la longitud base en el cuarto de medición (20°C). 9) Almacenamiento: Se coloca en un contenedor de almacenamiento, a una temperatura de 40 ± 2°C y una humedad igual o mayor al 95%.

4. Método de prueba	<p>Detalles de la prueba</p>	<p>El día anterior a que se cumpla la edad determinada, el espécimen se traslada al cuarto de medición (20°C), para tenerlo en el cuarto durante más de 16 h.</p> <p>10) Medición de variaciones en la longitud: a la edad determinada (de 2, 4, 8, 13 (3 meses) y 26 semanas (6 meses)).</p> <p>11) Observación del aspecto exterior: En el momento de la medición, se observan las anomalías del espécimen, como la flexión, burbujas, fisuras, lixiviados gelatinosos o manchas.</p> <p>12) Cálculo de la tasa de expansión:</p> $\text{Tasa de expansión} = \frac{(\text{Longitud a la edad determinada}) - (\text{Longitud base})}{(\text{Longitud efectiva de calibre})} \times 100$
5. Método de evaluación	<p>Normas aplicables</p> <p>Criterio de determinación</p>	<p>1) Proyecto Provisional del Ministerio de Construcción [Prueba de reactividad álcali-silice de agregados (Método de barra de mortero)].</p> <p>2) JIS A 5308 Anexo 8 [Método de la prueba de reactividad álcali-silice de agregados (Método de barra mortero)].</p> <p>El agregado se determina como nocivo cuando el valor promedio de las tres barras sea igual o mayor al 0.1% después de 6 meses.</p> <p>Puede ser considerado nocivo el agregado que haya mostrado una expansión igual o mayor al 0.05% a los 3 meses.</p>
6.	<p>Expresión del resultado</p>	<p>1) Lugar de procedencia y tipo del agregado.</p> <p>2) Tipo y marca del cemento.</p> <p>3) Porcentaje de contenido alcalino del cemento (Óxido de potasio (K₂O), Óxido de sodio (Na₂O) y el contenido alcalino total (R₂O)).</p> <p>4) Tasa de expansión medida en cada edad y su promedio.</p> <p>5) Otros aspectos importantes observados en el espécimen en el momento de la prueba o después.</p>
7.	<p>Consideraciones</p>	<p>Cuando se utilice material considerado nocivo para la elaboración del concreto, se tomarán las medidas inhibitorias establecidas por separado.</p>

7) Cálculo de la tasa de expansión

La tasa de expansión se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Tasa de expansión (\%)} = \frac{(X_i - sX_i) - (X_{ini} - sX_{ini})}{L} \times 100$$

donde X_i : lectura del deformímetro de carátula (dial gauge) del espécimen a la edad i .

sX_i : lectura del deformímetro de carátula de escala estándar del espécimen a la edad i .

X_{ini} : lectura del deformímetro de carátula del espécimen en el momento del desmolde.

sX_{ini} : lectura del deformímetro de carátula de escala estándar del espécimen en el momento del desmolde.

L : longitud efectiva del calibre (distancia entre la punta interior de los discos.

(X_i , sX_i , X_{ini} , sX_{ini} y L deben estar expresados en la misma unidad).

Si fijamos en forma constante la lectura del deformímetro de carátula de escala estándar en un valor determinado (en cero), la fórmula anterior será:

$$\text{Tasa de expansión \%} = \frac{(\text{longitud a la edad determinada } X_i) - (\text{longitud de base } X_{ini})}{(\text{longitud efectiva del calibre } L)} \times 100$$

Con esto, se simplifica mucho el cálculo y se reducen las posibilidades del error.

8) Determinación

El Proyecto Provisional del Ministerio de Construcción y JIS determina como nocivo el agregado que muestra una tasa de expansión igual o menor al 0.1% con un periodo de almacenamiento de seis meses. Por lo consiguiente, la determinación de la reactividad de la muestra se debe realizar después de seis meses, en principio, pero si se observa una expansión igual o mayor a 0.05% a los tres meses, se puede determinar como nociva la reactividad de la muestra.

Como una información de referencia, en la gráfica 9 se señalan los resultados de la prueba aplicada a los tres tipos de agregados: A, B y C.

El agregado A presentó una expansión superior al 0.10% después de 13 y 26 semanas, por lo que se determina nocivo.

El agregado B mostró más del 0.05% de expansión después de 13 semanas, pero a las 26 semanas presentó una expansión menor al 0.1%, por lo que se considera inocuo.

El agregado C muestra una expansión menor al 0.1% después de 13 semanas y 26 semanas, por lo que se juzga como inocuo.

Como hemos visto, se registran muchos casos de muestras que presentan una expansión superior al 0.05% después de 3 meses, pero que muestran una expansión inferior al 0.1% después de seis meses, por lo que se consideran inocuas. De acuerdo con el registro que tuvimos en las pruebas de barra de mortero realizadas en nuestro laboratorio desde el año pasado hasta el mes de septiembre de este año, la relación observada entre la expansión a los tres meses (X) y a los seis (Y) es la siguiente:

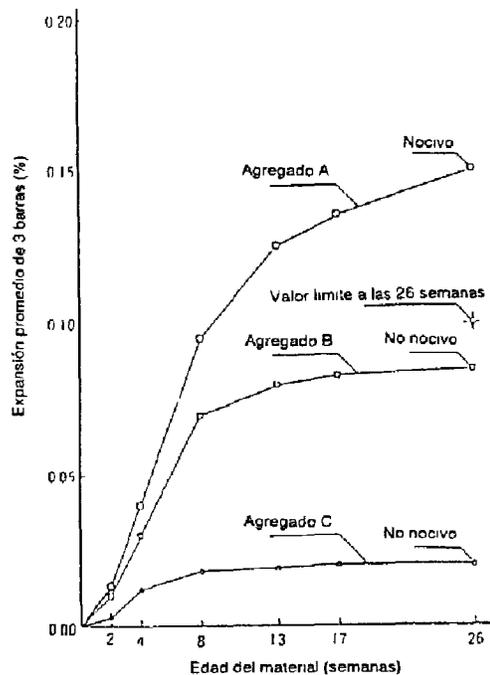
$$Y = 1.068X + 0.829 \quad (N = 424, r = 0.995)$$

Esto quiere decir que la expansión registrada entre tres y seis meses es únicamente del 7%, por lo que se recomienda no sacar conclusiones a los tres meses, sino seguir con las mediciones hasta completar los seis meses. Las relaciones entre la edad del material y la tasa de expansión varían mucho de acuerdo con la composición de las rocas y la especie de minerales reactivos; por eso, los datos referentes a este aspecto se usarán siempre como valores de referencia.

Si un espécimen presenta una tasa de expansión igual o mayor al 0.1% a los tres meses o antes, puede ser determinado como nocivo para terminar la prueba.

Gráfica 9

Un ejemplo del resultado de la prueba por el método de barra de mortero.



6. Para terminar

Los agregados, como arena y grava de río, de suelo y de cantera, son una mezcla de diferentes rocas, y sus características pueden variar dependiendo del lugar de extracción (por ejemplo, por la profundidad y el sitio exacto de la extracción en una misma mina). Aunque los agregados procedan de una misma cantera, sus características pueden ser diferentes por el estrato de las rocas trituradas, por lo que hay que tener mucho cuidado al recolectar las muestras, para obtener muestras representativas. Antes de la prueba, es necesario dividir, reducir y ajustar la muestra para conservar la representatividad original.