

RECOMENDACIONES TECNICAS PARA VACIADOS DE CONCRETO MASIVO

(Informe 1)



Elaborado por:

ING. PABLO JHOEL PEÑA TORRES

Octubre 2020

Lima, Perú



I1: CONCRETO MASIVO

Indice

1. Introducción	4
2. Definición de concreto masivo	5
3. Normativas relacionadas.....	6
4. Recomendaciones para la elaboración de concreto considerado como masivo	7
5. Problemática de los vaciados de concreto masivo.....	10
5.1. Fisuración por efectos térmicos.....	11
5.2. Formación de Etringita Diferida (DEF).....	13
6. Clasificación de los límites de temperatura máxima del concreto según su exposición. ..	18
6.1. Según ACI 201.2R-16	18
6.2. Según el LCPC.....	20
7. Bibliografía	28



I1: CONCRETO MASIVO

Lista de figuras

Figura 1: Aumento de temperatura del concreto masivo que contiene 223 kg/m ³ de cemento [3].	9
Figura 2: Ejemplo de agrietamiento térmico severo en la superficie superior de una cimentación [15]	12
Figura 3: Una diamantina de concreto extraído de la base de una cimentación muestra el grado de fisuración térmica.[15].....	12
Figura 4: Mecanismo de la expansión del DEF (Taylor et al. 2001)	13
Figura 5: DEF en una columna en San Antonio, Texas [18].....	14
Figura 6: Fisuras producidas por DEF en Pilar de Puente [19].....	14
Figura 7: (a) Etringita primaria no expansiva en pasta de cemento, vista bajo un microscopio electrónico de barrido; (b) Etringita secundaria no expansiva en un poro (1), vista con un microscopio electrónico de barrido; (c) Etringita expansiva (1 y 2) en contacto con un agregado (3), visto bajo un microscopio electrónico de barrido [17].	15
Figura 8: Bloque experimental de concreto masivo [20].....	18
Figura 9: Diagrama de flujo para la determinación del nivel de prevención frente al riesgo de RSI [11].	27

Lista de tablas

Tabla 1: Medidas recomendadas para reducir el potencial para DEF en concreto expuesto a elevadas temperaturas a edades tempranas.....	19
Tabla 2: Categoría de obra	21
Tabla 3: Clases de exposición del elemento de la obra frente a la RSI	22
Tabla 4: Elección del nivel de prevención.....	22
Tabla 5: Precauciones a aplicar frente a la RSI	24
Tabla 6: Tipos de cemento según el nivel de prevención	25



I1: CONCRETO MASIVO

1. Introducción

Actualmente en nuestro país se presentan proyectos de gran infraestructura (sector minero, hidro energético, industrial, etc), donde se colocan grandes volúmenes de concreto para distintos tipos de estructuras. Alrededor del 40% del volumen de concreto en estos proyectos están en vaciados considerados como masivos.

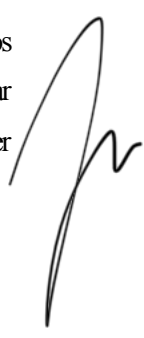
Estos tipos de concretos deben tener consideraciones especiales para así cumplir las características de desempeño requeridas en las Especificaciones Técnicas del Proyecto (EETT). Sin embargo, el problema muchas veces está en la definición y las tolerancias de estas consideraciones debido al poco entendimiento de las causas y los efectos de las patologías que generan estos vaciados de concreto en el elemento estructural.

Luego de realizar una revisión bibliográfica de la literatura existente sobre normativas y recomendaciones que involucren la construcción de vaciados de concretos masivos, se encontraron lineamientos y consideraciones en documentación internacional basado en las características del concreto a utilizar y su posterior exposición en su vida útil. Sin embargo, se constató la ausencia de estos lineamientos en la Norma Nacional de Concreto Armado (E-0.60).

A priori, los vaciados de concreto masivo generan un considerable aumento de temperatura en el concreto a edades tempranas producto de la hidratación del cemento, por lo cual es necesario realizar un monitoreo constante durante los primeros días y así evitar patologías indeseables en la estructura. Cuando no existe un control térmico adecuado del elemento a vaciar, la generación de calor del concreto podría provocar dos problemas en la estructura:

- I. Se podría generar un elevado gradiente térmico entre el interior del concreto y la superficie expuesta, lo cual causaría fisuras en el concreto.
- II. La elevada temperatura en el núcleo de concreto a edades iniciales podría provocar la formación de etringita diferida (DEF), que es un compuesto expansivo que tendería a microfisurar y posteriormente fisurar el concreto.

En este documento se pretende dar lineamientos para identificar a los elementos considerados como vaciados de concreto masivo y explicar la problemática que este involucra; así como dar consideraciones a tomar en cuenta durante las etapas de diseño y construcción a fin de obtener una estructura que cumplan las características de desempeño de las EETT de cada Proyecto.



11: CONCRETO MASIVO

2. Definición de concreto masivo

El American Concrete Institute (ACI) en tres de sus comités define al concreto masivo de la siguiente manera:

- Según el ACI 116 “Terminología del cemento y del hormigón” [1, p. 116] el concreto masivo es “cualquier elemento de grandes dimensiones que genere que se tomen medidas preventivas para contrarrestar la generación de calor interior debido a la hidratación de cemento causando cambios volumétricos y con esto, fisuras o grietas”
- Según el ACI 207.1-05 “Guide to Mass Concrete” [2] “(...) la característica que distingue al concreto masivo del resto de concretos convencionales es su comportamiento térmico”.
- Según el ACI 211.1R-91 “Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete” [3] indica lo siguiente respecto a la definición del concreto masivo “muchos elementos estructurales de grandes dimensiones pueden ser lo suficientemente masivos como para que se tome en cuenta la generación de calor, particularmente cuando las dimensiones mínimas de la sección transversal de un elemento estructural se aproximan o exceden de 2 a 3 pies (0,61 a 0,91m) o cuando se utilizan contenidos de cemento por encima de 600 lb/yd³ (356 kg/m³)”. Se debe dar consideraciones similares a otras colocaciones de concreto que cumplan con estas definiciones pero que contienen cemento de alto calor de hidratación.
- Según el ACI 301-16 “Specifications for Structural Concrete” [4, p. 301] el concreto masivo es cualquier “Volumen de concreto estructural en el que la combinación de las dimensiones del elemento a vaciar, las condiciones de contorno, las características del concreto y las condiciones ambientales pueden provocar esfuerzo térmicos indeseables, agrietamiento, reacciones químicas nocivas o reducción de resistencia a largo plazo como resultado de la elevada temperatura del concreto debido al calor de hidratación”.

De lo mencionado líneas arriba, se puede desprender que el criterio para considerar un vaciado de concreto como masivo es el riesgo a la fisuración por cambios volumétricos originados por el calor generado debido a la propia hidratación del cemento (comportamiento térmico), el espesor de la sección mínima del elemento a vaciar, la cantidad y el tipo de cemento (calor de hidratación) a utilizar en la dosificación de la mezcla.

De las experiencias registradas en diferentes tipos de proyectos, se ha notado variaciones en los registros de temperaturas según las características del elemento a vaciar. Por ejemplo, una zapata de 1,5m de espesor, en el cual se utilizó un concreto de $f'c = 21\text{MPa}$ con 320 kg/m³ de cemento Tipo V, generó una temperatura máxima en el núcleo de 58°C y en el vaciado de un muro de 0,6m



I1: CONCRETO MASIVO

de espesor, en el cual se utilizó un concreto de $f'_c = 35\text{MPa}$ con 460 kg/m^3 de cemento Tipo I, generó una temperatura máxima en el núcleo de 71°C . Por lo que es importante enfatizar que este comportamiento térmico de elevada temperatura depende de la cantidad de cemento, tipo de cemento, espesor del elemento y no necesariamente del volumen del elemento a vaciar.

A modo de ejemplo, en un vaciado de 1200 m^3 de concreto y utilizando una misma dosificación de concreto podríamos tener comportamientos térmicos diferentes en función de las dimensiones del elemento. Si ese volumen de concreto es utilizado en una losa de concreto de $0,2\text{m}$ de espesor con una sección en planta de $60\text{m} \times 100\text{m}$ tendríamos mucho menor generación de temperatura en el núcleo que, en una sección de concreto de una fundación de 2m de espesor con una sección en planta de $20\text{m} \times 30\text{m}$. Sin embargo, realizando una evaluación normativa de este ejemplo, notamos que la losa de $0,2\text{m}$ de espesor no cumple el requerimiento de espesor mínimo del ACI 211.1 para ser considerado con un vaciado de concreto masivo, por lo cual solo la fundación de 2m de espesor es considerada como un vaciado masivo.

Dentro de las estructuras que también deberían considerarse de comportamiento masivo están los elementos prefabricados, debido a que el concreto utilizado en este tipo de elementos es sometido a un tratamiento térmico que genera una elevada temperatura inicial para su puesta en servicio en plazos de tiempo reducidos respecto a los elementos convencionales de concreto [5].

3. Normativas relacionadas

A continuación, se indican las principales normas y especificaciones técnicas relativas al diseño y construcción del concreto masivo

- ACI 211.1-91 “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete” [3, p. 211]
- ACI 207.1R-05 “Guide to Mass Concrete” [2, p. 207]
- ACI 201.2R-16 “Guide to Durable Concrete” [6, p. 201]
- ACI 207.2R-07 “Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete” [7]
- ACI 207.3R-94 “Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions” [8, p. 3]
- ACI 207.4R-93 “Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete” [9, p. 4]
- ACI 207.5R-99 “Roller-Compacted Mass Concrete” [10, p. 5]
- ACI 301-16 “Especificaciones para concreto estructural” [4, p. 301]



11: CONCRETO MASIVO

- ICH “Especificación para hormigón masivo estructural” [11]
- CIMbéton “Guide de prescription des ciments pour des constructions durables : Cas des bétons coulés en place” [12]
- Eurocode 2 “Design of concrete structures – Part 3: Liquid retaining and containment structures” [13, p. 2]
- Guía Técnica “Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne” [5].
- Método de ensayo “Réactivité d’un béton vis-à-vis d’une réaction sulfatique interne – Essai de performance” [14].

4. Recomendaciones para la elaboración de concreto considerado como masivo

Como ocurre con otros tipos de concreto, el concreto masivo se compone de cemento, agregados, agua y con frecuencia puzolanas y aditivos; siendo solo el material cementicio quien genera una reacción exotérmica cuando reacciona con el agua. La elección del tipo de cemento y una eventual adición, debido a la prescripción del proyecto, deben tomar en cuenta los costos, la trabajabilidad, la durabilidad, la resistencia, la ausencia de fisuras, el bajo aumento de temperatura del concreto y en caso sean estructuras hidráulicas, una baja permeabilidad.

De hecho, el cementante (cemento y adiciones) debe ser lo menos exotérmico posible sin dejar de ser compatible con las especificaciones relacionadas con la clase de exposición y con los requerimientos de resistencia del concreto. Del mismo modo, la dosis de aglutinante se podría minimizar, a la menor cantidad posible, mientras se cumplen los requisitos de trabajabilidad, resistencia y durabilidad, esto a fin de minimizar el aumento de temperatura en el concreto. El uso de los cementos adicionados y/o la incorporación de adiciones son soluciones adecuadas para minimizar la reacción exotérmica del concreto. [2, p. 207], [5].

Para vaciados de concretos masivos, es deseable utilizar cementos de bajo o moderado calor de hidratación conforme a la norma ASTM C150 / NTP 334.009 (Cementos Portland), la norma ASTM C595 / NTP 334.090 (Cementos Portland Adicionados), la norma ASTM C1157 / NTP 334.082 (Cementos Portland Performance), o se use Cemento Portland con cenizas volantes clase F o cemento con escorias o ambos [4, p. 310].

De lo antes mencionado se puede concluir que para vaciados de concretos masivos no se recomienda el uso de Cemento Tipo I o GU sin medidas que ayuden a controlar los problemas de



I1: CONCRETO MASIVO

temperatura debido a su calor de hidratación sustancialmente más alto [2, p. 1] . Los cementos de alto calor de hidratación como los de Tipo III o HE tampoco son recomendados para vaciados masivos [4, p. 310].

A modo de ejemplo, el remplazo en el diseño de concreto de un Cemento Tipo I por un Cemento Tipo HS (en un elemento de un espesor de 1m) se traduce en una disminución de la temperatura máxima de 12°C aproximadamente.

En el Apéndice 5 del ACI 211.1 [3] se encuentran algunas orientaciones para dosificar concretos considerados masivos, “el propósito del procedimiento de dosificación de concreto masivo es combinar los materiales cementicios disponibles, agua, agregados y aditivos de manera que la mezcla resultante no exceda algún aumento de temperatura permitido y sin embargo cumpla los requisitos de resistencia y durabilidad. En algunos casos, se puede requerir dos mezclas: un concreto masivo interior y un concreto exterior a fin de resistir las diversas condiciones de exposición. En consecuencia, los especialistas de tecnología de concreto y diseñadores estructurales durante la etapa de diseño deben considerar los efectos de la temperatura en las propiedades del concreto”

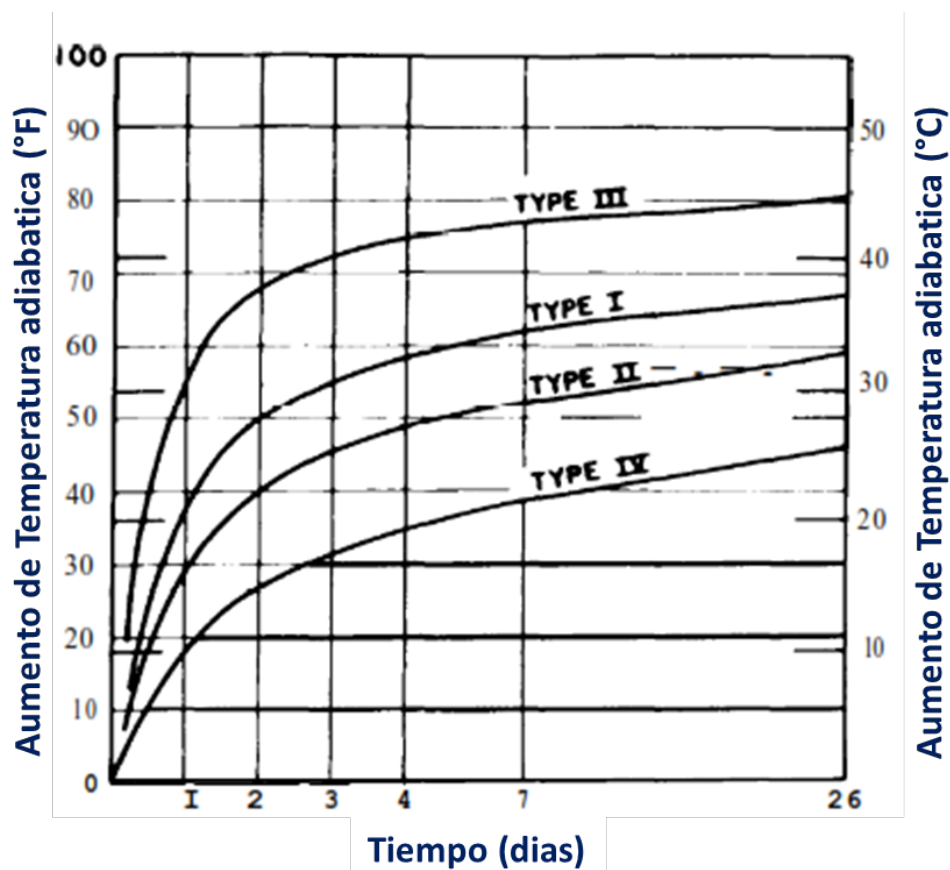
“Por ejemplo, una placa de 15cm de espesor disipa el calor generado con bastante facilidad, pero a medida que aumente el espesor y tamaño del elemento, se alcanza un punto en el que la tasa de calor generado supera con creces la tasa de calor disipado. Este fenómeno produce un aumento de temperatura dentro del concreto que puede causar suficiente diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la masa de concreto que inducen esfuerzos de tracción. El diferencial de temperatura entre el interior y el exterior del concreto generado por la disminución de las condiciones de temperatura del aire (ambiente) puede causar fisuras en las superficies expuestas. Además, a medida que el concreto alcanza su temperatura máxima y se produce el subsiguiente enfriamiento, este enfriamiento induce tensiones de tracción si el cambio de volumen está restringido por cimientos o conexiones a otras partes de la estructura. La cantidad de calor producido por el cemento es función de su composición química (Figura 1) y de su temperatura inicial. El cemento tipo II se utiliza con mayor frecuencia en el concreto masivo, ya que es un cemento de moderado calor de hidratación y generalmente tiene propiedades favorables para la mayoría de los tipos de construcción. Cuando se usa el cemento Tipo II combinado con Puzolanas, el calor generado es comparable con el del cemento Tipo IV” [3].

En el Perú las alternativas que cumplen con estas características son los cementos tipo IP, II, V, MS o HS. En el caso de utilizar escorias de alto horno o cenizas volantes, se mejorará la resistencia de los concretos frente a la Reacción Sulfática Interna (RSI), especialmente debido a la disminución relativa en la cantidad de aluminatos provenientes del Clinker y de la modificación

I1: CONCRETO MASIVO

de la naturaleza y de la textura de los hidratos. Además, el uso de adiciones como sustitución del cemento, contribuye a reducir la cantidad de sulfatos dentro del concreto.

La baja temperatura de colocación del concreto, comúnmente utilizada en vaciados de concretos masivos, por lo general disminuirá la tasa de hidratación del cemento y el calor inicial generado. En consecuencia, por el concepto de madurez, también se puede reducir el desarrollo de la resistencia en los primeros días. Otro aspecto que afecta la tasa de calor de hidratación es la finura del cemento; sin embargo, tiene poco efecto sobre el calor inicial generado. Los cementos finamente molidos producirán calor más rápidamente durante las primeras edades que un cemento molido más grueso, siendo todas las demás propiedades del cemento iguales [3].



Tipo de cemento	Finura (cm ² /gr) ASTM C115	Calor de hidratación a 28 días (Cal/gr)
I	1790	87
II	1890	76
III	2030	105
IV	1910	60

Figura 1: Aumento de temperatura del concreto masivo que contiene 223 kg/m³ de cemento [3].

I1: CONCRETO MASIVO

Luego de haber comprendido la importancia de la elección del cementante y haber definido que el material cementante es el principal componente que genera una reacción exotérmica en el concreto, los esfuerzos deben concentrarse en disminuir la cantidad de cemento a fin de reducir el calor generado por el concreto. Dentro de las alternativas para reducir la cantidad de cemento de la formulación de concreto, podemos indicar las siguientes:

- **Uso de agregados con mayor TNM:** Generalmente son las características geométricas y las disposiciones del refuerzo de las estructuras las que limitan el tamaño máximo del agregado que puede utilizarse. Sin embargo, también es necesario considerar la producción, el transporte y la trabajabilidad del concreto al momento de su colocación. Por definición y según lo indicado en el ACI 211.1 [3, p. 1] “los agregados de TNM de mayor tamaño tienen menos vacíos que los agregados más pequeños. Por lo tanto, los concretos con agregados de mayor tamaño requieren menos mortero por unidad de volumen de concreto”. Entonces de lo antes expuesto, se puede concluir que cuando se utiliza un agregado de mayor TNM se utilizara menos cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto.
- **Uso de aditivos reductores de agua:** Por definición y según el ACI 116-00 [1, p. 116], se denominan reductores de agua, plastificantes, superplastificantes o fluidificantes al aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir el contenido de agua de un determinado concreto. En consecuencia, a una relación a/cm constante, tendríamos una reducción de material cementante proporcional a la reducción de agua.

El uso de un aditivo retardante de fragua es una opción técnicamente adecuada en vaciados de concreto masivo; puesto que la inclusión de este aditivo, retardaría y disiparía la normal generación de calor del concreto durante los primeros días luego del vaciado, lo cual provocaría un leve descenso en la temperatura pico del núcleo de concreto. Sin embargo, esta alternativa es muchas veces inviable debido al alto costo del aditivo y, por ende, el consecuente aumento del costo del concreto.

A menos que se especifique lo contrario, no se debe utilizar aditivos acelerantes [4, p. 301], los cuales causarían una amplificación en los registros de temperatura obtenidos a edades tempranas.

5. Problemática de los vaciados de concreto masivo

La problemática envuelta en los vaciados de concreto masivo se da debido a la generación de calor del concreto provocada por el proceso de hidratación del cementante, el cual debe ser



11: CONCRETO MASIVO

controlado adoptando las medidas adecuadas a fin de cumplir los requerimientos de desempeño de los elementos estructurales involucrados. Estas medidas condicionaran el diseño, las especificaciones del concreto y la ejecución de la estructura.

El concreto genera calor debido al proceso de hidratación del material cementicio, lo cual es provocado por la reacción química que proporciona resistencia al concreto. Al igual que el desarrollo de la resistencia, la mayor parte de la generación de calor ocurre en los primeros días después de la colocación. Para elementos delgados como pavimentos rígidos, la energía térmica se libera casi tan rápido como se genera; sin embargo, para secciones más gruesas, específicamente concreto masivo, el calor no puede liberarse tan rápido como se genera, este calor queda atrapado y genera un aumento de temperatura en el concreto. A medida que aumenta la temperatura del concreto, se genera más calor, lo cual aumenta aún más la temperatura del concreto. Posteriormente, el concreto comienza a enfriarse porque hay una cantidad finita de energía térmica en los materiales cementicios [15]. Esta cantidad total de energía térmica depende de la cantidad y del tipo de materiales cementicios.

Existen dos preocupaciones que involucran a los vaciados de concreto masivo: el agrietamiento por efectos térmicos y la formación de etringita diferida (DEF). A continuación, se describe con más detalle el desarrollo de los fenómenos térmicos en los vaciados de concreto masivo.

5.1. Fisuración por efectos térmicos

La cantidad variable de generación y disipación de calor hace que el interior de la sección de concreto se caliente más que su superficie. En otras palabras, se desarrolla una diferencia de temperatura entre el interior y la superficie. Esto genera esfuerzos térmicos en el interior del concreto (debido a que el interior del concreto se expande y la superficie se contrae). El agrietamiento ocurre inmediatamente cuando el esfuerzo a tracción excede la resistencia a la tracción del concreto, este agrietamiento se denomina agrietamiento por efectos térmicos. En la mayoría de los casos, el agrietamiento térmico es un problema de durabilidad porque proporciona vías fáciles para que el aire y el agua lleguen al acero de refuerzo y comience la corrosión. En algunos casos, donde los esfuerzos térmicos son importantes, la fisuración puede afectar la capacidad estructural del concreto (Figura 2 y 3).



I1: CONCRETO MASIVO



Figura 2: Ejemplo de agrietamiento térmico severo en la superficie superior de una cimentación [15]



Figura 3: Una diamantina de concreto extraído de la base de una cimentación muestra el grado de fisuración térmica. [15]

El agrietamiento térmico adopta muchas formas. En ubicaciones de grandes fundaciones puede aparecer como mapas de fisuras aleatorias. En las paredes puede aparecer como una serie de fisuras verticales que son más anchas cerca de la base. En las vigas, puede aparecer como fisuras espaciadas uniformemente perpendiculares a la dimensión más larga de la viga [15].

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of a large loop followed by a series of smaller, connected strokes.

I1: CONCRETO MASIVO

Según el ACI 207.1R-05, para controlar la fisuración del concreto por estrés térmico, se debe restringir el delta térmico entre 14 °C y 19 °C, esto tomando en cuenta que el concreto contiene en promedio 139 kg/m³ de cemento y que el concreto carece de acero de refuerzo (límite hecho para trabajos de presas no reforzadas en Europa hace más de 75 años). De igual manera, el ACI 301-16, limita el delta térmico en 19 °C para los vaciados masivos.

Normalmente mantener un diferencial térmico de concreto en estos rangos es una labor difícil durante la construcción, tomando en cuenta que el concreto que se utiliza en elementos estructurales contiene más de 300 kg/m³ de cemento. Además, las tendencias recientes muestran secciones de mayor espesor y altos contenidos de cemento o bajas relaciones a/cm, esto hace que el control de temperatura sea aún más difícil [16]. Por lo que la máxima diferencia de temperatura permitida está en función de las propiedades mecánicas del concreto, como la expansión térmica, la resistencia a la tracción y el módulo elástico, así como el tamaño y las restricciones del elemento de concreto [7, p. 2], [16].

5.2. Formación de Etringita Diferida (DEF)

La otra preocupación es la causada por la elevada temperatura a la que el concreto puede llegar a edades tempranas, estas altas temperaturas modifican la reacción de hidratación del cemento.

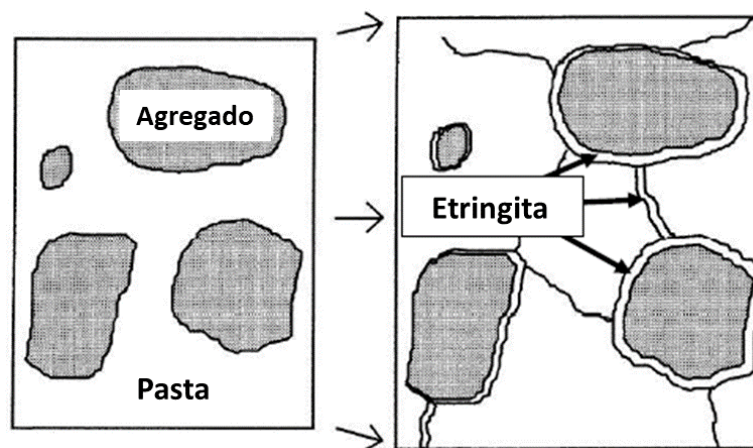


Figura 4: Mecanismo de la expansión del DEF (Taylor et al. 2001)

A temperaturas superiores de 70°C (158°F) se podrían desarrollar productos de hidratación inestables en algunos concretos. Esto se conoce como una reacción sulfática interna (RSI) que es definida como la formación de etringita diferida (DEF: Delayed Ettringite Formation) en un material cementicio. En los concretos donde se produce DEF, los productos de hidratación inestables pueden eventualmente comenzar a expandirse dentro del concreto en estado endurecido. Este es un efecto a largo plazo que puede no ocurrir durante meses o años después

I1: CONCRETO MASIVO

del vaciado de concreto sin aporte de sulfato externo. En su peor forma, el DEF puede causar un agrietamiento significativo en la estructura de concreto (Figura 5 y 6) [6].



Figura 5: DEF en una columna en San Antonio, Texas [17]



Figura 6: Fisuras producidas por DEF en Pilar de Puente [18]

I1: CONCRETO MASIVO

Se debe entender que en el concreto siempre hay etringita (trisulfato-aluminato de calcio hidratado) y necesita el consumo de grandes cantidades de agua. En el concreto se distinguen tres tipos de etringita [5], [19]:

- **Etringita Primaria:** Se forma en los primeros instantes de hidratación del cemento bajo la acción de sulfatos de origen interno del concreto (los sulfatos de calcio introducidos en el cemento como regulador de fraguado reaccionan al contacto del agua con el aluminato tricálcico C_3A y dan lugar a la etringita primaria). Nunca es expansivo ni patológico. Luego se descompone para formar monosulfo-aluminato de calcio. Se presenta más comúnmente en forma de agujas.
- **Etringita Secundaria:** Se desarrolla cuando el concreto se encuentra en estado endurecido. Si los sulfatos son de origen interno, la etringita es estable y no es de carácter expansivo. Si los sulfatos son de origen externo, la etringita puede generar expansión.
- **Etringita Diferida:** Se desarrolla cuando el concreto se encuentra en estado endurecido. Puede provocar o no expansión. Los iones sulfatos son de origen interno. Se trata de un concreto en el que la etringita primaria no pudo formarse en los primeros instantes de hidratación. Esta formación de etringita genera esfuerzos internos en el concreto, que pueden ser lo suficientemente grandes como para provocar su microfisuración y en última instancia, su hinchamiento. Son muchas las condiciones que deben cumplirse, tanto a nivel de los componentes del concreto, como el incremento térmico y humedad del ambiente, para que aparezca este tipo de etringita, lo que explica su rareza.

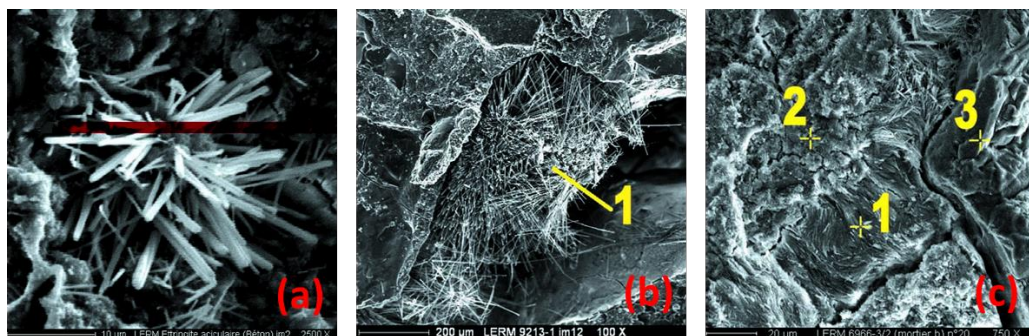


Figura 7: (a) Etringita primaria no expansiva en pasta de cemento, vista bajo un microscopio electrónico de barrido; (b) Etringita secundaria no expansiva en un poro (1), vista con un microscopio electrónico de barrido; (c) Etringita expansiva (1 y 2) en contacto con un agregado (3), visto bajo un microscopio electrónico de barrido [19].

Es necesario distinguir el fenómeno de reacción sulfática interna (RSI), del fenómeno de reacción sulfática externa (RSE), conocido desde 1887 y señalado por Candlot debido a observaciones en los morteros reforzados de Paris cuando estaban en contacto con una mezcla de agua y yeso. En

I1: CONCRETO MASIVO

el caso de la RSE, las fuentes de sulfatos pueden ser aportadas por los suelos, mediante sales de deshielo o ser transportadas por agua subterránea, agua de filtración, agua de mar o agua generada por sitios industriales. Los sulfatos penetran a través de la red capilar del concreto y pueden causar la formación de la llamada etringita “secundaria” que puede generar fenómenos de expansión y, por lo tanto, degradaciones del concreto. Entonces, en el caso de la RSE, se genera una degradación progresiva desde la superficie hasta el núcleo del elemento de concreto [5].

En ciertos casos, cuando el concreto sufre un aumento de temperatura a edad temprana, puede aparecer el fenómeno de la reacción interna del sulfato (RSI), y esto, sin la contribución del sulfato por una fuente externa. El DEF puede ocurrir en 2 tipos de concreto: concretos tratados térmicamente (por ejemplo, los elementos prefabricados) y concretos de secciones importantes vaciados en obra: secciones de concreto para las cuales el calor liberado se descarga parcialmente hacia el exterior y conduce a una elevación importante de la temperatura del concreto [5]. Para prevenir el DEF, la regla general es mantener la temperatura del concreto a menos de 70°C (158°F) o utilizar los rangos establecidos en el ACI 201.2R-16.

La gran mayoría de iones de sulfato de origen interno proveniente del cemento y bajo ciertas condiciones, pueden disolverse en la solución intersticial del concreto. La reacción sulfática involucra a estos iones de sulfato presentes en la solución intersticial, así como a los aluminatos del cemento, y puede conducir a la formación de etringita susceptible de provocar la expansión en el concreto endurecido. El fenómeno de expansión sulfática interna puede manifestarse por la aparición de fisuración multidireccional formando una malla relativamente grande de 10 a 30cm en la superficie de concreto [5].

Para lograr la reacción sulfática interna (RSI) es esencial la conjunción de varios parámetros para iniciar y desarrollarla. Los parámetros principales son el agua, la temperatura y su tiempo de retención, el contenido de sulfato y aluminato del cemento, así como el contenido de álcali del concreto [5], [7, p. 207]:

- **Agua y humedad:** Se puede constatar, tanto en laboratorio como en obras, el rol fundamental del agua en el desarrollo de la reacción. El agua es un medio reactivo necesario para el desarrollo de la reacción. El agua y la humedad intervienen también en los procesos de transferencia, así como en la formación de productos de reacción. La RSI afecta principalmente las partes de las estructuras en contacto con el agua (zona sumergida, zona de mar) o sometidos a afluencia de agua (falta de estanqueidad, ausencia de drenaje, etc), incluso expuestas a un alto nivel de humedad.
- **Temperatura y tiempo de retención:** La temperatura máxima alcanzada y su duración en el tiempo condicionan el riesgo de formación de etringita diferida. Se ha mostrado en



I1: CONCRETO MASIVO

laboratorio que; si la temperatura supera los 65°C y si los otros parámetros primordiales están presentes, generalmente se desarrolla una RSI. Así, una elevada temperatura del concreto durante el fraguado y la madurez es una condición indispensable pero que no es suficiente.

- **Contenido de sulfatos y aluminatos del cemento:** Los sulfatos y los aluminatos intervienen directamente en el mecanismo de reacción para formar la etringita que es un trisulfoaluminato de calcio hidratado. En consecuencia, la RSI solo es posible si el cemento utilizado contiene suficiente aluminato tricálcico ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$) y de sulfato SO_3 .
- **Contenido de álcalis del concreto:** Su rol en la solubilidad de la etringita es bien conocido. La etringita es más soluble cuando aumenta el contenido alcalino. Debido a la variación de la solubilidad de la etringita con la temperatura, existe una fuerte interacción entre estos dos parámetros durante el proceso de la RSI. De igual manera, una disminución en el contenido de álcali aumentaría el valor crítico de la temperatura.

Es necesario remarcar que muchas estructuras de concreto son relativamente inmunes a los efectos del DEF. Tales elementos incluyen aquellas aisladas del agua (por ejemplo, estructuras impermeabilizadas) o algunas que contienen materiales cementicios con cierta química resistente (como una mayor proporción de cenizas volantes o puzolanas).

Se pueden realizar pruebas para determinar si el concreto alcanzará altas temperaturas al momento de su colocación, de acuerdo a lo indicado en el Eurocode 2 (EN 1992-3:2006) [13] dentro del ítem relacionado a la evolución de calor y desarrollo de temperatura por hidratación, el cual indica lo siguiente: “Cuando las condiciones durante la fase de construcción se consideren significativas, las características de generación de calor de un cemento en particular usualmente deben obtenerse de ensayos. La evolución real de calor debe determinarse teniendo en cuenta las condiciones esperadas durante el tiempo de vida inicial del elemento (por ejemplo, curado, condiciones ambientales). El aumento máximo de temperatura y el tiempo de ocurrencia después del vaciado deben establecerse a partir del diseño de la mezcla, la naturaleza del encofrado, las condiciones ambientales y las condiciones de contorno”.



I1: CONCRETO MASIVO



Figura 8: Bloque experimental de concreto masivo [20].

Cuando se pueda demostrar que el DEF no es una preocupación, se justifican temperaturas más altas; sin embargo, las temperaturas superiores a 85°C (185°F) pueden reducir las propiedades estructurales del concreto (resistencia y módulo de elasticidad) [15].

6. Clasificación de los límites de temperatura máxima del concreto según su exposición.

De la bibliografía internacional revisada se encontró tres documentos que dan clasificaciones de límites de temperatura máxima del concreto a edades tempranas. Estos son el ACI 201.2R-2016 (EEUU), la Guía Técnica del LCPC (Francia) y las Especificaciones para hormigón masivo estructural del ICH (Chile). De estos documentos, el ICH [11] se basa en el documento del LCPC [5] para determinar la clasificación de temperaturas de los vaciados de concreto masivo, por lo cual en este ítem se desarrollará lo indicado en las recomendaciones del ACI y LCPC. Estas clasificaciones están basadas en las características físico químicas del cemento, la temperatura máxima alcanzada en el núcleo de concreto y a la exposición ambiental de la estructura en su vida útil.

6.1. Según ACI 201.2R-16

El ACI 201.2R -16 [6, p. 2] en la tabla 6.2.2.2 “Medidas recomendadas para reducir el potencial para DEF en concreto expuesto a elevadas temperaturas a edades tempranas” define una clasificación de temperaturas máximas admisibles en el núcleo de concreto en función a las características del cemento a utilizar.

I1: CONCRETO MASIVO

Tabla 1: Medidas recomendadas para reducir el potencial para DEF en concreto expuesto a elevadas temperaturas a edades tempranas

Temperatura máxima del concreto, $T_{\max}$	Prevención requerida
$T \leq 158^{\circ}\text{F}$ (70°C)	No requiere prevención
$158^{\circ}\text{F} < T \leq 185^{\circ}\text{F}$ ($70^{\circ}\text{C} < T \leq 85^{\circ}\text{C}$)	Usar uno de los siguientes enfoques para minimizar los riesgos de expansión: 1. Cemento Portland que cumple con los requerimientos de la ASTM C150/C150M de moderado o alta resistencia a los sulfatos y cemento de bajo alkali con valores de fineza menores o iguales a $430 \text{ m}^2/\text{kg}$. 2. Cemento Portland con resistencia de mortero a 1 día (ASTM C109/C109M) menor o igual a 2850 psi (20 MPa). 3. Cualquier cemento portland ASTM C150/C150M en combinación con las siguientes proporciones de puzolana, cemento con escorias: a. Mayor o igual a 25% de ceniza volante que cumpla con los requerimientos de ASTM C618 para ceniza volante clase F. b. Mayor o igual a 35% de ceniza volante que cumpla con los requerimientos de ASTM C618 para ceniza volante clase C. c. Mayor o igual a 35% de cemento de escoria que cumpla con los requerimientos ASTM C989/989M. d. Mayor o igual a 5% de humo de sílice (Cumpliendo con ASTM C1240) en combinación con al menos 25% de cemento de escoria. e. Mayor o igual a 5% de humo de sílice (cumpliendo con ASTM C1240) en combinación con al menos 20% de ceniza volante clase F.

I1: CONCRETO MASIVO

	f. Mayor o igual a 10% metacaolín que cumpla con ASTM C618. 4. Un ASTM C595/C595M o ASTM C1157M mezclado con cemento hidráulico con el mismo contenido de puzolana o cemento de escoria listado en el punto 3.
T > 185°F (85°C)	La temperatura interna del concreto no deberá exceder 185°F (85°C) bajo ninguna circunstancia.

6.2. Según el LCPC

La Guía Técnica del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées “Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne” [5] menciona recomendaciones constructivas a considerar en la etapa de diseño y construcción, así como precauciones a aplicar para la etapa de colocación y dosificación de concreto. Estas recomendaciones toman en cuenta lo siguiente:

- La categoría de la obra;
- Las condiciones medioambientales a las que estarán expuestas los elementos estructurales durante su vida útil;
- Las condiciones térmicas del concreto al momento de su colocación y durante su endurecimiento.

Las precauciones a considerar están en función del nivel de prevención definido para cada parte de la obra potencialmente “crítica” según la clase de exposición elegida.

Estas recomendaciones solo se refieren a elementos de grandes estructuras de concreto en contacto con el agua o sometidas a un ambiente húmedo. Se trata de elementos masivos o “críticos” para las que el calor liberado durante la hidratación del cemento (el fraguado y el endurecimiento del concreto generan una liberación de calor debido a la naturaleza exotérmica de las reacciones de hidratación) es poco evacuado hacia el exterior, lo que conduce a un aumento significativo de la temperatura en el núcleo del concreto.

El principio del procedimiento preventivo consiste en identificar los elementos del proyecto que son susceptibles de ser sometidos a un fenómeno de RSI (Reacción Sulfática Interna), para luego definir un nivel de prevención necesario en función de la categoría de la obra (Categorías I a III de la Tabla 2, traduciendo el nivel de riesgo que el cliente está dispuesto a aceptar) o de la parte de la obra y clases de exposición específicas a la RSI (Tabla 3, integrando la importancia de los parámetros de agua y humedad) traduciendo el medioambiente en el cual se encuentra el concreto.



I1: CONCRETO MASIVO

A cada nivel de prevención (As, Bs, Cs, Ds: Tabla 4 obtenidas cruzando clases de exposición y categorías de obra) corresponden a las precauciones a aplicar. Por lo tanto, deben aplicarse precauciones adaptadas a cada nivel de prevención para cada parte de la estructura en cuestión.

Tabla 2: Categoría de obra

Categoría de obra	Nivel de consecuencia de aparición de RSI	Ejemplos de obras o de partes de la obra
I	Débiles o aceptables	• Obra de concreto de resistencia inferior a C16/20 ($f'_c < 17\text{MPa}$). • Elementos no portantes en edificios. • Elementos fácilmente reemplazables. • Obras provisionales. • La mayoría de productos prefabricados no estructurales.
II	Poco tolerables	• Elementos portantes de la mayoría de edificios y obras de Ingeniería Civil (puentes convencionales). • La mayoría de productos prefabricados estructurales (Incluyendo las tuberías de baja presión).
III	Inaceptables o cuasi inaceptables	• Edificios reactores de centrales nucleares. • Presas, túneles. • Puentes y viaductos de gran importancia. • Edificios patrimoniales. • Traviesas de ferrocarril.

Nota: La categoría de la obra depende de su utilización y del nivel de consecuencia en termino de seguridad que el cliente está dispuesto a aceptar.



11: CONCRETO MASIVO

Tabla 3: Clases de exposición del elemento de la obra frente a la RSI

Clase de exposición	Descripción del medioambiente	Ejemplos informativos
XH1	Seco o humedad moderada	- Parte de una estructura de concreto situada al interior de edificios donde el porcentaje de humedad relativa es baja o media. - Parte de una estructura de concreto situada al exterior y expuesta a la lluvia.
XH2	Alternancia de humedad y secado, humedad elevada	- Parte de una estructura de concreto situada al interior de edificios donde el porcentaje de humedad relativa es alta. - Parte de una estructura de concreto no protegida por un revestimiento y sometida a la intemperie sin estancamiento en la superficie. - Parte de una estructura de concreto no protegida por un revestimiento y sometida a frecuentes condensaciones.
XH3	En contacto constante con el agua: inmersión permanente, estancamiento de agua en la superficie, zona de marea.	- Parte de una estructura de concreto sumergido permanentemente en agua (pilotes, fundaciones). - Elementos de estructuras marinas. - Algunas fundaciones. - Parte de una estructura de concreto regularmente expuesta a salpicaduras de agua.

Nota: Estas clases de exposición específicas a la RSI deben ser especificadas en los planos para cada parte de la obra susceptible de ser sometida a un fenómeno de RSI.

Tabla 4: Elección del nivel de prevención

Categoría de la obra	Clase de exposición		
	XH1	XH2	XH3
I	As	As	As
II	As	Bs	Cs
III	As	Cs	Ds

11: CONCRETO MASIVO

Nota: La elección del nivel de prevención para cada parte de una estructura es responsabilidad del cliente. El nivel de prevención debe ser especificado en las EETT. Dentro de la obra, las partes susceptibles de ser sometidas a fenómenos de RSI pueden ser objeto de prevenciones diferentes.

Las precauciones se modulan en función del nivel de prevención. Se refieren principalmente a la temperatura máxima del concreto que se debe respetar. También es posible tomar precauciones sobre el diseño de mezcla si fuera necesario.

Las precauciones a aplicar dependen de cada nivel de prevención en orden ascendente de exigencias de As a Ds. Básicamente, su objetivo es limitar la temperatura máxima que probablemente se alcanzara en el núcleo de la sección crítica de concreto.

A modo de ejemplo:

- Las precauciones a aplicar para el caso más común, es decir el nivel de prevención As, son las siguientes:
 - La temperatura máxima (T_{MAX}) admisible en el centro del elemento de concreto debe ser inferior a 85 °C.
- Para el nivel de prevención Bs, una de las dos precauciones siguientes debe ser aplicada en obra:
 - La temperatura máxima (T_{MAX}) admisible en el centro del elemento de concreto debe ser inferior a 75 °C.
 - Si T_{MAX} no es inferior a 75°C, la temperatura debe ser inferior a 85 °C y una de las condiciones siguientes debe ser aplicada:
 - El tratamiento térmico es acelerado, la duración de mantención de la temperatura del concreto más allá de 75°C no debe exceder 4 horas y los alcalinos equivalentes activos del concreto deben ser inferior a 3 kg/m³. (La duración de mantención es definida como el periodo durante la cual la temperatura es superior a 75°C).
 - Utilización de un cemento adaptado o de un cemento combinado con adiciones.
 - Verificación de la durabilidad del concreto frente a la RSI con la ayuda del ensayo de desempeño [14].



I1: CONCRETO MASIVO

Tabla 5: Precauciones a aplicar frente a la RSI

Nivel de prevención	Temperatura máxima del concreto, T_{MAX}	Temperatura límite del concreto, T_{LIMITE}	Condiciones a respetar si la temperatura está comprendida entre T_{MAX} y T_{LIMITE}
As	85 °C	90 °C	En el caso de un tratamiento térmico acelerado (podría ser realizado en una fábrica de concreto pre fabricado): se permite una temperatura (T_{MAX}) superior a 85°C hasta 90°C, a condición de que la duración de una temperatura superior a 85°C se limite a 4 horas.
Bs	75 °C	85 °C	- El tratamiento térmico es acelerado, la duración de mantención de la temperatura del concreto más allá de 75°C no debe exceder 4 horas y los alcalinos equivalentes activos del concreto deben ser inferior a 3 kg/m³. (La duración de mantención es definida como el periodo durante la cual la temperatura es superior a 75°C) o; - Cemento adaptado o cemento combinado con adiciones o; - Ensayo de desempeño.
Cs	70 °C	80 °C	El tratamiento térmico es acelerado, la duración de mantención de la temperatura del concreto más allá de 70°C no debe exceder 4 horas y los álcalis equivalentes activos del concreto deben ser inferior a 3 kg/m³. (La duración de mantención es definida como el periodo durante la



I1: CONCRETO MASIVO

			cual la temperatura es superior a 70°C) o; • Cemento adaptado o cemento combinado con adiciones o; • Ensayo de desempeño
Ds	65 °C	75 °C	• Cemento adaptado y • Validación del diseño de mezcla por un laboratorio independiente experto en RSI.

T_{MAX}: temperatura máxima del concreto esperada en el núcleo de la sección de concreto

T_{LIMITE}: temperatura límite del concreto que no puede ser superada.

Tabla 6: Tipos de cemento según el nivel de prevención

Nivel de prevención	Cemento adaptado
Bs	• Cemento conforme a la norma NF P 15-319 (ES) (Nota 1). • CEM II / B-V ; CEM II / B-S ; CEM II / B-Q ; CEM II/B-M (S-V) ; CEM III/A ; CEM V (Nota 2). • CEM I en combinación con cenizas volantes, escorias de alto horno, puzolanas naturales calcinadas (Nota 3). • Proporción de adiciones superiores a 20% (Nota 4).
Cs	• Cemento conforme a la norma NF P 15-319 (ES) (Nota 1). • CEM II / B-V ; CEM II / B-S ; CEM II / IB-C ; CEM II / B-M (S-V) ; CEM III / A ; CEM V (Nota 2). • CEM I en combinación con cenizas volantes o escorias de alto horno, puzolanas naturales calcinadas (Nota 3) y proporción de adiciones superior a 20% (Nota 4).
Ds	• Cemento conforme a la norma NF P 15-319 (ES) (Nota 1).

- **Nota 1:** En el caso de CEM I y CEM II/A, contenido de álcalis activos equivalente en el concreto es limitado a 3 kg/m³.
- **Nota 2:** Cemento con contenido de SO₃ inferior a 3% y con C₃A del Clinker inferior a 8%.

11: CONCRETO MASIVO

- **Nota 3:** El CEM I debe respetar un C_3A (Especificación técnica del cemento) inferior a 8% y SO_3 inferior a 3%.
- **Nota 4:** La proporción de adiciones debe respetar las especificaciones de la norma NF EN 206-1.

Este documento propone disposiciones para limitar los riesgos potenciales de reacción sulfática interna (RSI):

- A nivel de diseño y dimensionamiento de estructuras: evitando zonas de estancamiento de agua, protegiendo el concreto mediante impermeabilización y favoreciendo los elementos huecos.
- A nivel de la formulación de la mezcla de concreto, es preferible escoger cementos de bajo calor de hidratación.
- Para la fabricación del concreto se debe considerar el enfriamiento de agregados, uso de agua a bajas temperaturas y la reducción del tiempo en el transporte del concreto.
- Para la colocación del concreto, es recomendable evitar el vaciado de concreto en periodos de alta temperatura ambiental y privilegiar los encofrados que no aíslan la temperatura.

Estas disposiciones deben permitir:

- Limitar la temperatura máxima en el núcleo de concreto
- Evitar los contactos prolongados del concreto con el agua.

El LCPC ha desarrollado un ensayo de desempeño acelerado en el concreto [14] permitiendo evaluar la durabilidad del concreto “Formulación de la mezcla y calentamiento del concreto” frente a la formación de etringita diferida seguida de su expansión, adaptada a las condiciones de ejecución, como el ciclo de tratamiento térmico aplicado al concreto durante el vaporizado en una planta de prefabricación y el calentamiento de un elemento de concreto masivo colocado in situ. Esta prueba de 12 a 15 meses de duración, consiste en caracterizar el riesgo de expansión del concreto con respecto al RSI. Valida una formulación de concreto determinando su reactividad potencial a la formación de etringita diferida.



I1: CONCRETO MASIVO

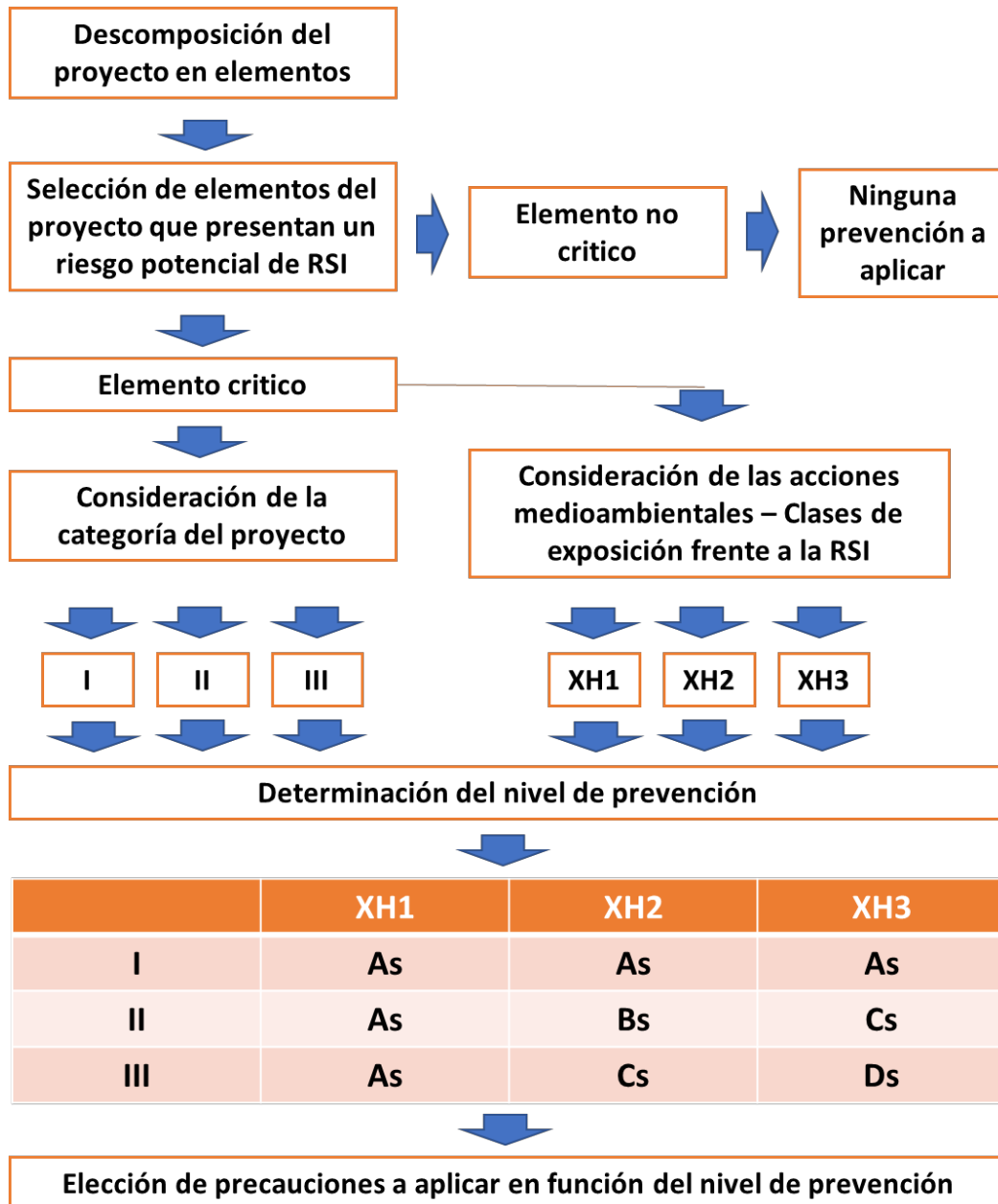


Figura 9: Diagrama de flujo para la determinación del nivel de prevención frente al riesgo de RSI [12].

11: CONCRETO MASIVO

7. Bibliografía

- [1] C. 116 ACI, *ACI 116 - Terminología del cemento y el hormigón*. .
- [2] C. 207 ACI, *ACI 207.1R-05 Guide to Mass Concrete*. 2005.
- [3] C. 211 ACI, *ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete*. 1991.
- [4] C. 301 ACI, *ACI 301-16 Specifications for Structural Concrete*. 2016.
- [5] LCPC, « Guide technique - Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne. » 2007.
- [6] C. 201 ACI, *ACI 201.2R-16 Guide to Durable Concrete*. 2016.
- [7] C. 207 ACI, *ACI 207.2R-07 Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete*. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 2007.
- [8] C. 207 ACI, *ACI 207.3R-94 Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions*. 1994.
- [9] C. 207 ACI et al., *ACI 207.4R-93 Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete*. 1993.
- [10] C. 207 ACI, *ACI 207.5R-99 Roller-Compacted Mass Concrete*. 1999.
- [11] ICH, *Especificación para hormigón masivo estructural*. Santiago, Chile, 2019.
- [12] CIM béton, *Guide de Prescription des ciments pour constructions durables - Cas des bétons coulés en place*. France.
- [13] Eurocode 2, *Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 3 : Liquid retaining and containment structures*. 2006.
- [14] LCPC, « Méthode d'essai des lpc n°66 - Réactivité d'un béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne ». 2007.
- [15] J. Gajda et E. Alsamsam, « Engineering Mass Concrete Structures », EEUU, p. 8, nov. 2006.
- [16] J. Gajda et M. Vangeem, « Understanding mass concrete is the key to controlling temperatures and ultimately saving time, effort, and money », *Concrete International*, p. 4, janv. 2002.
- [17] K. J. Folliard, « Prediction Model for Concrete Behavior: Final Report », p. 77, mai 2008.
- [18] L. Divet et A. Pavoine, « DELAYED ETTRINGITE FORMATION IN MASSIVE CONCRETE STRUCTURES : AN ACCOUNT OF SOME STUDIES OF DEGRADED BRIDGES », p. 29, 2002.
- [19] C. Carde, « Pathologie L'ettringite ». Laboratoire Matière, Abril 2007, [En ligne]. Disponible sur: www.betons-lemagazine.fr.
- [20] C. P. Bobko, R. Seracino, P. Zia, et A. Edwards, « Crack Free Mass Concrete Footings on Bridges in Coastal Environments », p. 234, 2014.

