



Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Civil

## Trabajo Final

### Tema 6: Spalling Método para determinar el grado de riesgo

### Diseño de Edificios contra Incendios CI57 B

Alumnos : Felipe Carmona A.  
Nicole Navarro D.  
Evelyn Vilches G.  
Profesor : Gabriel Rodriguez B.  
Profesor Auxiliar : Miguel Perez A.  
Fecha de Entrega : 10 Junio 2009

## **Introducción.**

En el presente informe se pretende profundizar en el tema del Spalling y las variables que lo afectan, dando cuenta del rigor necesario en el ejercicio de la Ingeniería en Seguridad Contra Incendios.

Para esto se detallará el planteamiento del documento "Fire resistance of concrete enclosures: Work Package 1: data collection y Work Package 2: spalling categories" sobre la metodología para asignar valores de riesgo de spalling a distintas estructuras. Esta investigación fue realizada para la Dirección de Seguridad Nuclear de la Salud de la Health and Safety Executive (HSE) por ArupFire, el mes de Octubre del año 2005 y corresponde a la primera fase de un enfoque de ingeniería estructural contra incendios realizada para evaluar la respuesta al fuego de estructuras de hormigón, específicamente a incendios del tipo hidrocarburo en recintos nucleares (hormigones de peso y resistencia normales). La intención del proyecto era cuantificar el espesor de hormigón para proporcionar un aislamiento adecuado para recintos de hormigón de un fuego exterior.

La predicción de spalling para fines de diseño no es una tarea fácil debido a la naturaleza compleja y número de variables que intervienen en el proceso. Debido a esto no se había intentado antes cuantificar el proceso.

La investigación fue llevada a cabo en dos partes; en primer lugar, se recopilaron los datos disponibles sobre spalling y ensayos de las propiedades térmicas del hormigón (conductividad, calor específico y densidad) y sus materiales constituyentes, creándose así una base de datos de las propiedades de los materiales para los diferentes tipos de concretos. Luego, basándose en los resultados de la gama de hormigones que se prevé utilizar para recintos nucleares, estos se clasificaron en un pequeño número de "grupos de riesgo de spalling" (muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo). Esta clasificación fue hecha por tipo de agregado, % de humedad, dilatación térmica y resistencia del hormigón. A cada grupo de riesgo se le asignó un espesor de spalling basado en hipótesis conservadoras acerca de los datos recopilados al inicio.

Las propiedades térmicas (conductividad, densidad, calor específico) fueron extraídas de los proyectos de investigación disponibles y la literatura de dominio público para diferentes hormigones, áridos y pastas de cemento.

En la segunda parte, de clasificación, se desarrollaron, como ya se dijo, cinco categorías de riesgo basadas en tipos de concreto y las asociadas condiciones límite de la base de datos creada.

Además, se tomaron en cuenta factores adicionales que afectaban el spalling, recopilados también de la literatura. Dentro de estos, fueron considerados el espesor de la sección, las cargas o solicitaciones, la presencia de refuerzo y el número de lados expuestos al fuego de la sección de hormigón.

## 1. Propiedades térmicas del hormigón.

Las propiedades térmicas para diferentes hormigones, áridos y pastas de cemento (conductividad, densidad, calor específico) contempló una búsqueda en la literatura de dominio público. Esto puso de manifiesto una gran coherencia en los valores de la densidad, la conductividad y calor específico para los distintos tipos de hormigones de peso normal y de resistencia normal y para los agregados asociados.

Las conclusiones de esta primera parte, de recopilación de datos, pueden resumirse como sigue:

- La densidad del hormigón disminuye con la temperatura. Para los diferentes hormigones de peso normal varía entre 2000- 2600 kg / m<sup>3</sup> a temperatura ambiente y se reduce a 1500 - 2300 kg / m<sup>3</sup> a 900 ° C.
- Distintos agregados tienen diferentes densidades, lo que afecta la densidad de hormigón. Sin embargo, la densidad de hormigón también dependerá de la mezcla de cemento. Concretos usando agregados de peso liviano (por ejemplo, esquistos expandidos) tienen una baja densidad. En concretos de peso normal, la densidad está en el rango mencionado anteriormente.
- La conductividad del hormigón disminuye con la temperatura. Para los distintos hormigones de peso normal oscila entre 0,8 -2,6 W / mK a temperatura ambiente y se reduce a 0,5 -1,3 W / mK a 1000 ° C.
- Concretos que contiene cuarzo tiene una mayor conductividad, por lo tanto los agregados silíceos tienen mayor conductividad que concretos calcáreos. La conductividad de hormigón aumenta con el aumento del contenido de humedad.
- El calor específico del hormigón varía entre 750- 920 J / kgK a temperatura ambiente y aumenta a 930-1230 J / kgK a 1000 ° C. Hay peaks de calor específico cuando la humedad se evapora, a 100 ° C, y alrededor de 500-700 ° C, como resultado de un cambio de fase químico. No hay diferencia significativa entre el calor específico de hormigones calcáreos y silíceos.

## 2. Spalling

Los concretos deben comportarse bien a altas temperaturas. Las ventajas del hormigón en un incendio son principalmente dos: Es incombustible (por ejemplo, cuando se compara con la madera), y un buen material aislante que posee una baja difusividad térmica (calor no puede pasar fácilmente a través de él, por ejemplo, en comparación con el acero), efecto que decrece al aumentar la temperatura. Sin embargo, una de las principales desventajas del concreto es el spalling, que es la ruptura de capas o piezas del concreto de la superficie de un elemento estructural cuando es expuesto a temperaturas altas y en aumento, como las que se experimentan en incendios.

Hay muchos tipos de spalling, el spalling explosivo es el tipo más agresivo y se debe a la acción combinada de la presión de poro creada por la evaporación de la humedad y de los altos esfuerzos en el material caliente cuando tiende a expandirse en contra de su entorno incluyendo el hormigón adyacente, más fresco o con carga inicial. Esto depende del agregado, contenido de humedad, el nivel de esfuerzos, velocidad de calentamiento y la temperatura entre otras variables

El spalling puede ser insignificante en cantidad y consecuencia, como en las picaduras de la superficie del concreto, o puede afectar gravemente la estabilidad de la construcción debido a una gran eliminación del hormigón de refuerzo o porque causa agujeros al aparecer en placas o paneles, lo cual puede resultar en la inestabilidad o en la falla de la función de contención. Esto puede ocurrir poco después de la exposición al calor, acompañado de violentas explosiones, o cuando el hormigón se ha vuelto tan débil después de la exposición al calor, que desarrolla grietas y las piezas se caen de la superficie.



Figura1: Spalling

### 2.1. Tipos de spalling

**Spalling Explosivo-** Este tipo de spalling se produce durante la primera parte de un incendio, por lo general, dentro de los primeros 30 minutos (más o menos) en una prueba estándar de horno. Esto puede ocurrir en una etapa temprana justo por encima de 100 ° C. Se caracteriza por grandes o pequeñas piezas de hormigón que son violentamente expulsadas de la superficie, acompañada de un fuerte ruido. Las piezas pueden ser muy pequeñas; de 100 mm, o tan grandes como de 300 mm de longitud y 15-20mm de profundidad. El fenómeno puede ocurrir sólo una vez o a intervalos, incluso antes de que las partes sean expulsadas). Las capas múltiples son más probables en hormigones de alta resistencia que en hormigones de resistencia normal. En ocasiones, la

gravedad de los spalling explosivos puede dar lugar a la formación de agujeros a través del espesor de la sección. En muchos casos, este tipo de spalling se limita a la parte no reforzada de la sección y por lo general no procede más allá de la capa de refuerzo.

- **Spalling superficial** - Este tipo de spalling se asocia con la eliminación local de material de la superficie, incluyendo, picaduras y formación de ampollas. Esto ocurre cuando los pedazos pequeños, hasta unos 20mm de tamaño, vuelan fuera de la superficie de un elemento de concreto, en la primera parte de la exposición a un incendio o a una prueba de fuego. El Spalling superficial puede resultar en la exposición del refuerzo.

- **División del agregado** - Este tipo de spalling es la falla de los agregados del concreto cerca de la superficie, se caracteriza por un sonido de estallido. Es causada por la dilatación térmica de los agregados y la división de sus piezas cerca de la superficie, debido a cambios físicos o químicos que ocurren a altas temperaturas en los agregados. Las principales causas son la conversión de cuarzo a limonita-hematita a 570 ° C. Esto tiene poco impacto en el rendimiento estructural, ya que la mayoría de la cobertura se mantiene intacta y aísla el refuerzo. Además, como el spalling superficial del agregado sólo causa daños en la superficie del hormigón, la función de aislamiento estructural al fuego es poco afectada.

- **Separación de esquina** - Este tipo de spalling ocurre durante las últimas etapas de la exposición a un incendio cuando el hormigón se ha vuelto débil y se desarrollan grietas como resultado de esfuerzos de tracción a lo largo de los bordes y de las esquinas, donde se encuentra, normalmente, el refuerzo. Las piezas de hormigón se caen de las vigas y columnas, y esto puede ser seguido por pedazos que provienen de las caras lejanas, lo que desarrolla aún más las grietas. Debido a la avanzada etapa en la que estos spalling ocurren, la resistencia del elemento puede ya estar reducida significativamente, y por lo tanto este tipo de spalling puede ser de importancia limitada para la estabilidad estructural (que ya se ha perdido).

- **Desprendimiento desactivado** - Este es un proceso gradual progresivo que es causado por el deterioro de la pasta de cemento y el interno agrietamiento del hormigón debido a la diferencia entre la dilatación térmica de los agregados y la pasta de cemento. Este tipo de spalling está relacionado con la temperatura del concreto alcanzada y no con la velocidad del calentamiento que tiende a definir spalling explosivos.

- **Post enfriamiento del spalling** -Este es un proceso no violento, sin sonido y es causado por los agregados de carbonato en la dilatación de la piedra caliza o la rehidratación durante la fase de enfriamiento de un incendio.

La Investigación sugiere que el spalling explosivo es la forma de spalling más importante cuando la velocidad de calentamiento es rápida, por ejemplo en un incendio estándar de hidrocarburos. La pérdida significativa de material durante un spalling explosivo conduce a un aumento más rápido de la temperatura en el resto de la sección y a una reducción de la carga y las funciones de contención del elemento. Esta es la única forma que se consideró dentro de la investigación.

## **2.2. Factores que determinan la ocurrencia de spalling**

Los factores que afectan spalling y que fueron consideradas a la hora de determinar las categorías de riesgo se examinan a continuación:

### **i. Contenido de humedad.**

Es uno de los principales factores que causan spalling. En la ausencia de humedad, la probabilidad de spalling explosivo se reduce. Sin embargo, el spalling explosivo debido al estrés térmico puede ocurrir sin humedad en los materiales cerámicos, por ejemplo.

Se ha demostrado que el aumento de contenido de humedad aumenta la probabilidad de spalling. Por lo tanto, los hormigones en condiciones de humedad (por ejemplo, en un ambiente externo) tenderán a sufrir de spalling más rápida y extensamente, que un hormigón seco. Esto se debe a que la humedad aumenta la conductividad térmica y por lo tanto la velocidad a la que los concretos responden al calor y a la que se produce vapor de agua, el cual se acumula al interior del hormigón, produciéndose un spalling más temprano.

Es comúnmente aceptado que las construcciones tradicionales de hormigón (peso normal, resistencia normal) con menos del 3% del peso en contenido de humedad no darán lugar a spalling explosivos y que el concreto tradicional en el rango de 3-4% contenido de humedad tiene un riesgo limitado de spalling. Sin embargo, se ha observado spalling en algunos limitados casos de bajo contenido de humedad (<3%).

En la literatura, el contenido de humedad es expresado en términos de humedad relativa del hormigón. Niveles de humedad relativos más altos conducen a un mayor spalling. El nivel de humedad relativa aceptable del hormigón para reducir el riesgo de spalling es de 75 %.

### **ii. Razón agua / cemento, Permeabilidad.**

La pasta de cemento con una razón agua/cemento baja, produce una densa, casi impenetrable microestructura, que impide que el vapor de humedad se escape a una temperatura ambiente alta. Esto puede conducir a aumentar la presión interna de poros en la pasta de cemento. Por consiguiente el hormigón es sensible a experimentar spalling explosivo y spalling múltiple.

El hormigón de alta resistencia (HSC) normalmente tiene una baja razón agua / cemento, por lo tanto, es más propenso a experimentar spalling en comparación con un hormigón de resistencia normal.

La permeabilidad es especialmente importante en los incendios de alta velocidad de calentamiento, tales como incendios de hidrocarburos, debido a que la baja permeabilidad atrapará la humedad y la presión aumentará rápidamente bajo el acelerado calentamiento, lo que generará spalling.

### iii. Condición de calentamiento

Es uno de los principales factores que influyen en el spalling. El spalling es mucho más severo en fuegos caracterizados por rápidas velocidades de calentamiento o de altas intensidades de fuego debido al gran aumento de la temperatura y el gradiente de humedad en las partes expuestas al fuego. Los incendios de hidrocarburo plantean una amenaza severa en cuanto a esto, pues el spalling explosivo parece ser la forma de spalling dominante en este tipo de incendio.

Además, el calentamiento de más de un lado de una sección de concreto (por ejemplo, 4 lados de una columna) aumenta la probabilidad de spalling.

### iv. Agregados

Para hormigones de peso normal, hay dos grupos comunes de agregados: los agregados silíceos tales como la cuarcita, grava, granito y sílex (piedra pedernal) y los agregados calcáreos como piedra caliza, dolomita y anorthosite.

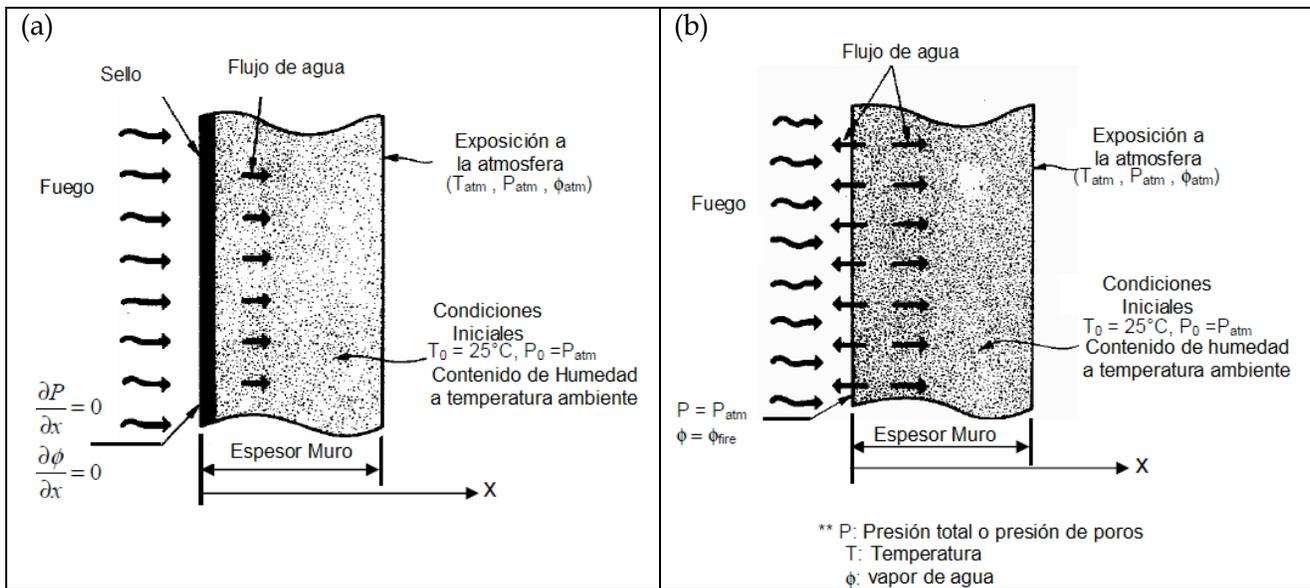
En general, se encontró que los agregados silíceos dan una resistencia más baja al spalling. Esto puede ser explicado en parte como consecuencia de los coeficientes notablemente diferentes de dilatación térmica entre el agregado y la pasta de cemento, especialmente a altas temperaturas, y en parte como resultado de un aumento de volumen (a aproximadamente 570°C) experimentado en la transformación de un  $\alpha$ -cuarzo a un  $\beta$ -cuarzo. La dilatación de los agregados conduce a grietas en el hormigón o la división del agregado, lo que contribuye al spalling.

Los agregados calcáreos tienden a tener un buen comportamiento frente al fuego, debido a que los agregados calcáreos tienen típicamente un coeficiente inferior de extensión térmica que los agregados silíceos y ellos están más cerca de la de pasta de cemento, produciendo tensiones internas más bajas por calor. En segundo lugar, no hay cambios de fase en estado sólido de agregados calcáreos bajo condiciones de exposición al fuego. A temperaturas superiores a 660°C los carbonatos de calcio comienzan a estropearse, de modo similar encima 740°C para los carbonatos de magnesio. El dióxido de carbono liberado de los minerales y la transferencia de calor son responsables de una reducción de la velocidad a pesar de que la reacción es endotérmica.

### v. Condición de prueba

El Hormigón por lo general es probado a altas temperaturas en condiciones selladas o abiertas, en que la condición abierta de prueba es más cercana a la realidad en lo que concierne a un edificio de hormigón en un incendio, en esta el vapor puede escaparse de la superficie del concreto de manera similar que en una pared o una losa en un incendio de un edificio. En pruebas selladas, el vapor de agua y el gradiente de presión de poros en la superficie expuesta al fuego son iguales a 0. La principal diferencia es que la humedad puede escapar hacia el incendio en una prueba no cerrada, pero se ve obligado a emigrar a través del hormigón en una prueba sellada.

El proceso dominante para el hormigón abierto se relaciona con la pérdida de varias formas del agua (libre, absorbida y químicamente atada), mientras el proceso dominante en el hormigón sellado se relaciona con las reacciones hidrotermales químicas.



**Figure 2:** Condición de prueba sellada (a) versus no sellada (b).

Se ha mostrado que tanto en condiciones selladas como abiertas, la presión de poro aumenta rápidamente a través de la región seca de la sección de concreto como consecuencia del alto flujo de calor por el fuego y la baja capacidad de transporte de masa del concreto caliente durante el período que se desarrolla la exposición al fuego. Por consiguiente, se espera spalling en el hormigón a tempranas etapas del incendio (típicamente los 20 primeros minutos) cuando la presión de poros excede el límite ultimo de resistencia a la tracción del hormigón. La presión de poros luego alcanza un valor constante o se disipa durante el estado estable y de enfriamiento del fuego. Similarmente, el spalling, por dilatación térmica, se reducirá, debido a que la temperatura cambia lentamente en la fase estable.

#### vi. Fuerza del concreto

El spalling en parte es atribuido al aumento de presión de poros durante el calentamiento. El hormigón de alta resistencia es más susceptible a este aumento de presión, debido a su permeabilidad baja, que inhibe la fuga de vapor de agua. El hormigón con resistencia más alta que 55MPa es más susceptible al spalling y puede causar una menor resistencia al fuego. En el hormigón de fuerza normal, el vapor puede ser transportado mucho más fácilmente a la superficie no expuesta lo que reduce el riesgo de spalling. Hay que notar que puede haber una significativa variación entre la resistencia de diseño especificada para un hormigón particular y la resistencia real alcanzada in situ. De hecho, el 95% de las muestras de concretos probadas in situ deberían alcanzar una resistencia mayor que la resistencia de diseño. La variación en la resistencia puede aumentar en 20 % o más.

#### vii. Magnitud de la sección

La magnitud de la sección es un factor muy importante en el spalling, mientras mas gruesa la sección, menos probable es que ocurra spalling. CIRIA concluyó que en vigas de sección mayor o

igual a 200mm, es muy difícil que se produzca un spalling serio, de hecho un ábaco de diseño en EC2 sugiere que vigas con secciones mayores a 200mm no sufren spalling.

Hay otras variables que involucran la magnitud de la sección del concreto, como por ejemplo, el spalling explosivo es inverosímil si la humedad del concreto es menor al 2,5% en peso y la sección no es menor a 80mm de espesor.

### viii. Fuerza aplicada

Altas tensiones de compresión debido a cargas externas o de pre-tensión hacen que aumenten la probabilidad que ocurra el spalling explosivo. Según Schneider 1986, normalmente el spalling explosivo no ocurre en elementos con baja humedad, sometido a pequeñas cargas y en condiciones de fuego normales.

### ix. Restricciones

Las restricciones pueden obstaculizar la extensión termal y dar lugar a tensiones termal (Hertz, 2003). Por otro lado, las restricciones pueden resultar beneficiosas en vigas que se flectan debido a una fuerza externa aplicada; esto ya que la tracción en la zona inferior de la viga flectada se reduce por la dilatación que provoca el gradiente térmico. Ver figura 3

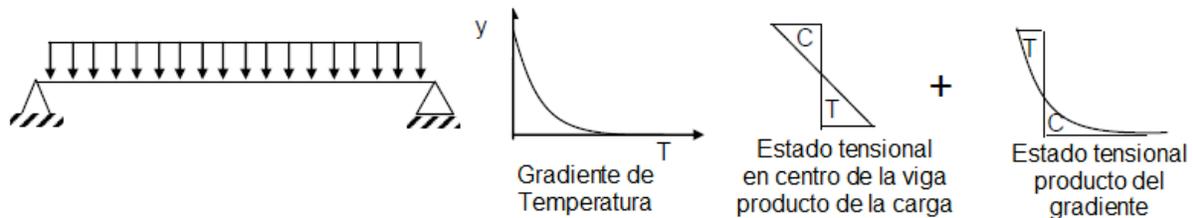


Figura 3: Ejemplo de una viga expuesta a un gradiente termal

### x. Dilatación térmica

La dilatación de un concreto da una medida de su probabilidad de sufrir spalling. Los concretos que tienen la dilatación térmica restringida están mas afectados al spalling. De la misma manera, concretos con poca dilatación térmica reducen la tensión por calor y por lo tanto aumenta la resistencia al spalling.

### xi. Refuerzo

El refuerzo en el hormigón mejora la resistencia del spalling debido a que retrasa o para la evolución del spalling a la altura en que se encuentra el refuerzo. Por otro lado, se cree (Meyers Ottens 1977) que la dilatación del refuerzo contribuye al spalling y mas aún cuando hay mayor cantidad de acero presente en la sección de hormigón.

## **xii. Recubrimiento**

Mientras mayor sea el recubrimiento, mayor es el riesgo que se produzca spalling. Aunque este espesor de cubierta va a depender del tipo de agregado que se utilice para mezcla de hormigón. Sin embargo, la BS 8110 Part 2 recomienda realizar medidas adicionales a secciones con mas de 40mm de espesor.

## **xiii. Fibras**

El uso de fibras de polipropileno en la mezcla del hormigón ayuda a reducir el spalling, ya que a temperaturas bajas se mezcla formando una maya que permite liberar las presiones de vapor y la presión al interior del concreto.

## **xiv. Densidad**

No se tiene evidencia de cómo se afecta el spalling con la variación de la densidad, pero si se sabe que los cementos de alta resistencia necesitan aumentar su densidad, por lo que la relación agua/cemento es reducida, de manera que se pierde la permeabilidad del hormigón disminuyendo la resistencia al spalling.

## **xv. Conductividad**

Alta conductividad térmica implica un aumento de las temperaturas en el hormigón, por lo que crece la probabilidad de que se produzca el spalling.

## **xvi. Calor específico.**

No hay información relacionada de cómo varia el spalling con el calor específico.

### 2.3. Influencia de cada variable.

A pesar de que no se tiene claro cual es la variable que define al spalling, si se sabe que todas se relacionan directamente al contenido de humedad, a la presión de poros y a la tensión. La tabla 4.3-1 muestra los principal dos factor que afectan al spalling, según investigadores.

Investigador	Principal Factor	Factor Secundario
Satio (1965)	Carga inicial + Restricción a la dilatación + tensión causada por la resistencia friccional en el concreto	Presión de Vapor
Harmathy (1965)	Estorbo de la humedad	
Meyer-Ottens (1977)	Presión de vapor aumentada por la resistencia friccional del concreto + carga inicial + restricción a la dilatación	Carga inicial + restricción a la dilatación + resistencia friccional en el concreto, dilatación del refuerzo
Sertmehmetoglu (1977)	Estorbo de la humedad + grietas internas	Carga inicial
Akhtarzzaman and Sullivan (1970)	Presión de Vapor	
Gustafarro (1966)	Presión de Vapor	Dilatación del agregado
Copier (1977)	Presión de Vapor + carga inicial	

**Tabla 1:** Factores claves que afectan el spalling – Tensión o contenido de humedad

A continuación se presentan los puntos más importantes a tomar en cuenta para la creación de una categoría de riesgo:

- La causa principal del spalling en el concreto es la humedad y la respectiva generación de presión de poros al calentarse la humedad.
- Se asume que una humedad mayor al 3% produce spalling.
- La humedad tendrá una elevada puntuación de riesgo definida en 5.2.
- La tasa a la que se aplica calor influye sustantivamente en la tasa que se produce el spalling, dado que mientras más rápido se aplique el calor, mas rápido se producirá presión de vapor y por ende más rápido se producirá el spalling en etapas tempranas del incendio.
- Aunque no tan bien definido como la humedad, la tensión debido a cargas y la restricción de la dilatación térmica también inducen al spalling. Esto se debe principalmente a la gran cantidad de variables que afectan a la tensión. Cada una de estas variables será valorada en la categoría de riesgo.
- Todos los elementos de una estructura están en cierto modo con alguna restricción. Una sección libre solo existe en un horno estándar. Esto será evaluado en la categoría de riesgos.

La presencia de refuerzo (armadura) será considerada para promover la resistencia al spalling cuando se defina la categoría de riesgo.

### **3. Definición de categorías de riesgo.**

#### **3.1. Descripción**

La idea es generar categorías de riesgo para el spalling basado en los factores significativos comentados en el punto 3 y los datos disponibles de los conjuntos de trabajo 1 y 2.

*Conjunto de trabajo 2:* Basado en los resultados del conjunto de trabajo 1, el rango de concretos esperados a usar en un recinto nuclear cerrado, serán categorizados en un pequeño grupo de riesgo al spalling (alto, mediano y bajo). Se espera que los grupos sean categorizados por tipo de agregado, porcentaje de contenido de humedad, dilatación térmica y resistencia del hormigón.

Se asignará un cierto grosor del spalling a cada grupo de riesgo basado en los supuestos del conjunto de trabajo 1.

Se proponen 5 categorías para el riesgo del spalling, en las cuales se consideraran factores adicionales como grosor de la sección, carga, presencia de refuerzo y número de lados del concreto que están expuestos al incendio.

#### **3.2. Definición del riesgo asociado a cada variable**

Con el fin de clasificar distintos tipos de concreto en categorías según las variables de influencia, se estableció un límite inferior y uno superior. Un valor de 1 representa el límite inferior de una variable, es decir, es improbable que sea afectado por spalling. Un valor de 3 se corresponde al límite superior de aquellas variables que puedan causar, con mediana probabilidad, spalling y un valor de 5 corresponderá a aquellas que tengan un gran efecto, por ejemplo humedad sobre el 3%.

Los valores del riesgo de 1, 3 y 5 representan una escala aproximada, con el fin de caracterizar el concreto con el nivel del conocimiento que la investigación permite. En cada caso la investigación indica cuales características pueden inducir el spalling y sus valores permiten distinguir entre las características que tienen mayor o menor influencia.

La información en la literatura no permite distinguir la importancia relativa del refuerzo, tipo de agregado, recubrimiento, sección, número de caras expuestas, restricciones o carga inicial en la ocurrencia de spalling. Por lo tanto a todos ellos se ha asignado el mismo valor: 1 cuando la característica mejora el comportamiento o 3 cuando la característica empeora el comportamiento. Los datos de la literatura y de ensayos han demostrado que la presencia de la humedad y el índice de calentamiento tienen un impacto más significativo que el refuerzo, agregados, etc. Por lo tanto a estas variables se les ha asignado un valor levemente más alto, igual a 5 cuando la tasa de calentamiento es equivalente al fuego de hidrocarburos o la humedad es mayor que un 3%.

El spalling del concreto de alta resistencia en un fuego estándar de hidrocarburos es difícil de cuantificar. Por lo tanto, para el propósito de este proyecto se asume que el concreto de alta resistencia nunca es menos que categoría D cuando está expuesto a un fuego de hidrocarburo. Esto es un acercamiento simplista pero se requiere para completar y poner las categorías del riesgo en perspectiva.

Los valores tomados deben ser considerados tomando en cuenta las siguientes limitaciones:

- En general, no se espera que suceda spalling en concretos con un contenido de agua por debajo del 3%, aunque ha habido excepciones en los datos de literatura y de ensayos, sin embargo, para los propósitos de este trabajo se asume que el 3% es el valor crítico para que ocurra spalling porque un gran número de investigadores ha convenido en este valor.
- Se asume una resistencia de diseño de 55MPa como el límite entre el concreto común y el de alta resistencia. El 95% de las muestras probadas deberían tener resistencias mayores que la de diseño. Sin embargo, un concreto mezclado in situ que tiene una resistencia mayor que la de diseño no es igual que un concreto del alto rendimiento con componentes silicios y permeabilidad muy baja, que es muy susceptible de presentar spalling.
- Los concretos con agregados de piedra caliza han mostrado un incremento en la resistencia al spalling, comparados con concretos silicios, pero hay excepciones en los datos de ensayos de este trabajo. Para el propósito de este ejercicio se han ignorado las excepciones.
- La revisión de la literatura ha demostrado que la humedad y el índice de calentamiento tiene un efecto significativo en la ocurrencia de spalling, mientras que el resto de las variables que inducen el spalling se consideran, generalmente, secundarias. El mismo criterio se ha utilizado para establecer los factores de riesgo.

Característica	Valor	Riesgo
Resistencia de diseño	> 55MPa	No cuantificado
Resistencia de diseño	<= 55MPa	1
Fuego de hidrocarburo		5
Fuego estándar	(BS 476)	1
Humedad	>3%	5
Humedad	<=3%	1
Sin refuerzo		3
Refuerzo incluido		1
Recubrimiento	>= 40mm	3
Recubrimiento	< 40mm	1
Agregado silicio		3
Agregado calcáreo		1
N° caras expuestas	> 1	3
N° caras expuestas	= 1	1
Sección	<200mm	3
Sección	>=200mm	1
Restricción		3
Sin restricción		1
Expansión termal	>= 10 x 10e-6	3
Expansión termal	< 10 x 10e-6	1
Cargado en compresión		3
Sin carga		1

Tabla 2: factores de riesgo de cada variable que induce spalling

### 3.3. Definición del riesgo total de spalling asociado a un concreto particular.

Con el fin de llegar a un valor del riesgo total de spalling para un concreto particular se propone que los riesgos asociados a las variables (en la tabla 2) pueden ser sumados, para alcanzar otra categoría. Se proponen 5 categorías genéricas (A-E), según la tabla 3 y se asocian a un valor del "riesgo total". Un valor de riesgo asociado a una categoría ha sido definido por la evidencia de ensayos de exposición al fuego.

Para obtener un valor del "riesgo total" para un concreto particular, todos los valores individuales relevantes del "riesgo" de la tabla 2 se suman. El valor del "riesgo total" entonces se encontrará en alguna de las categorías de la tabla 3.

Por ejemplo:

Concreto de Alta Resistencia (OSC): fuego de hidrocarburo, 2% de humedad, sin barras de refuerzo, recubrimiento > 40mm, agregado silíceo, 1 cara expuesta, sección >200m, restringido, baja expansión termal, descargado:

= 1+5+1+3+3+3+1+1+3+1 + 1 =23 → Categoría de riesgo C

Tabla 3: Categorías de riesgo de spalling y niveles de spalling asociado

Categoría	Riesgo de spalling	Valor total del riesgo	Factores clave
A	Muy bajo	<= 11	Esfuerzo normal, NWC, Sin carga Sin restricción, Exposición a fuego estándar, Contenido agua <3% Una cara expuesta
B	Bajo	12 - 20	Esfuerzo normal, NWC, Restringido, Exposición al fuego estándar Importante número de factores clave* con probabilidad de causar spalling
C	Medio	21 - 28	Esfuerzo normal, NWC, restringido Exposición a fuego de hidrocarburos estándar Bajo número de factores clave* con probabilidad de causar spalling
D	Alto	29 - 37	Esfuerzo normal, NWC, restringido Exposición a fuego de hidrocarburos estándar Importante número de factores clave* con probabilidad de causar spalling
E	Muy alto	> 37	Alta resistencia (resistencia de diseño mayor a 55MPa), exposición a fuego de hidrocarburos estándar

**Tabla 3:** Categorías de riesgo de spalling y niveles de spalling asociado (\* factor clave = propiedades del concreto o las condiciones límites que se sabe promueven el spalling, por ejemplo, tipo de agregado, espesor de la sección, etc.)

### **3.4. Cuantificación del nivel de spalling para cada categoría de riesgo.**

#### **4.4.1. Categoría A – Riesgo Muy Bajo.**

Esta categoría se asocia a elementos sin restricciones, descargados, probados en horno estándar donde la prueba ha demostrado que la ocurrencia de spalling es poco probable o muy limitada. Esta categoría no es representativa de elementos en construcciones reales, solo es una prueba en condiciones idealizadas. Además se asume un contenido de agua menor que el 3% del peso, de acuerdo a la literatura.

El valor del “riesgo total” asociado a esta categoría es la suma de todos los valores bajos en la tabla 2. La categoría A es un límite inferior para las categorías genéricas definidas en este proyecto.

Para la categoría A, por lo tanto, el valor de la posibilidad de spalling asumida es 0mm/min. Esto no es verdadero para el diseño pero es un buen punto de referencia para comparar.

#### **4.4.2. Categoría B – Riesgo Bajo.**

Para esta categoría se asume una exposición al fuego estándar, pero con varias variables dominantes como contenido de agua, que contribuye a la ocurrencia de spalling. En este caso la prueba en horno estándar sugiere que solo el recubrimiento del concreto sufriría spalling.

Para la categoría B, por lo tanto, la cantidad de spalling asumida es igual al recubrimiento del refuerzo.

#### **4.4.3. Categoría C – Riesgo Medio.**

La tasa de ocurrencia de spalling en esta categoría ha sido definida considerando datos de ensayos para peso normal, el concreto común en fuegos del hidrocarburo, que es el escenario considerado en este proyecto. Sin embargo, el fuego para el diseño no es el fuego estándar de hidrocarburos. Mientras el índice de calentamiento sea similar o menor que en un fuego estándar del hidrocarburo la probabilidad de ocurrencia de spalling será conservadora para el fuego del diseño. Pero las probabilidades pueden necesitar ser revisadas.

La tasa de spalling para el concreto pretensado de densidad normal en un fuego de hidrocarburos estándar se ha cuantificado en la literatura como 3mm/min. Asumiendo que cuando una capa de 10m m alcanza 360°C el concreto con spalling expondría los 10mm siguientes que también sufrirán spalling. Usando este método, 75mm de concreto mostraron comienzo de spalling después de 5minutos y muestra spalling completo luego de 19minutos. Esto es comparable a  $75 \times 3\text{mm}/\text{min} = 25$  minutos.

#### **4.4.4. Categoría D – Riesgo Alto**

La probabilidad de ocurrencia de spalling en esta categoría fue difícil de definir porque no hay registro para peso normal, concreto de resistencia normal donde muchos factores contribuyen a la ocurrencia de spalling. Es razonable asumir que la tasa de spalling será mayor que 3mm/min según lo definido en la categoría C.

Un conjunto de ensayos que consideran secciones de concreto pretensado, liviano, sin restricciones, sin carga, expuesto a fuego de hidrocarburos estándar en una cara, con resistencia de diseño sobre 60N/mm<sup>2</sup> presentan una profundidad de spalling de 180mm en 25minutos. Se concluyo que el spalling sucede a una tasa de 7mm/min.

Es probable que una tasa de entre 3-7mm/min sea lo más adecuado para definir concretos de categoría D, pero existen limitaciones dadas las pruebas disponibles, y 7mm/min está propuesto en esta etapa porque cualquier otro valor es difícil de justificar.

#### 4.4.5 Categoría E - Riesgo Muy Alto.

El nivel de spalling de la categoría E no es cuantificable, porque está asociado a concretos de alta resistencia en pruebas de fuego de hidrocarburos estándar. Las pruebas del fuego han demostrado que el spalling severo puede ocurrir en este escenario y la única manera de prevenirlo es incluir fibras de polipropileno en la mezcla de concreto.

La categoría E se ha creado como límite superior conocido de las otras categorías de este proyecto, y se presenta solo para realizar la comparación entre las tasas de spalling.

Categoría	Riesgo de spalling	Valor total del riesgo	Factores clave	Nivel de Spalling
A	Muy bajo	<= 11	Esfuerzo normal, NWC, Sin carga Sin restricción, Exposición a fuego estándar, Contenido agua <3% Una cara expuesta	Cero o mínimo
B	Bajo	12 - 20	Esfuerzo normal, NWC, Restringido, Exposición al fuego estándar Importante número de factores clave* con probabilidad de causar spalling	Sobre el nivel de el refuerzo
C	Medio	21 - 28	Esfuerzo normal, NWC, restringido Exposición a fuego de hidrocarburos estándar Bajo número de factores clave* con probabilidad de causar spalling	3mm/min
D	Alto	29 - 37	Esfuerzo normal, NWC, restringido Exposición a fuego de hidrocarburos estándar Importante número de factores clave* con probabilidad de causar spalling	7mm/min
E	Muy alto	> 37	Alta resistencia (resistencia de diseño mayor a 55MPa), exposición a fuego de hidrocarburos estándar	No cuantificable

**Tabla 4:** Riesgo final. Categorías con cuantificación de spalling asociada.

#### 4. Conclusiones.

- Los factores de riesgo y las categorías del riesgo que derivaron en las tablas 2, 3 y 4 se deben utilizar en recintos de concreto de resistencia normal, peso normal, según lo definido en este escrito.
- Los concretos ligeros no han sido considerados y el riesgo de spalling asociado a concretos de alta resistencia en un fuego estándar de hidrocarburos se presenta de una manera simplista, solo para la comparación con las otras categorías.
- La literatura ha demostrado que el spalling es causado principalmente por la humedad y una acumulación de las presiones del vapor en la matriz de concreto. El fuego causa la migración del agua y el cambio de base.
- El spalling como resultado de la tensión inducida por la expansión termal reprimida es también significativo, pero para categorizar el riesgo, en este proyecto, se ha considerado menos importante que la humedad, basado en la literatura.
- Este trabajo está limitado a pruebas sobre concreto ordinario de resistencia normal en respuesta al fuego estándar de hidrocarburo.
- Los concretos ligeros no se consideran en las categorías del riesgo.

#### 5. Comentarios.

Se ha realizado la revisión del documento:

“Fire resistance of concrete enclosures:  
Work Package 1: data collection y  
Work Package 2: spalling categories”

Se ha expuesto el contenido del documento mencionado intentando conserva lo más importante de él, con el fin facilitar la revisión y clasificación de estructuras en distintas categorías de riesgo.

Como resumen se puede establecer que en una rápida lectura de este trabajo es posible tomar conocimiento de cuáles son las variables más importantes que deben ser consideradas para iniciar la determinación del riesgo que tiene un elemento estructural de ser afectado por spalling, esta información puede ser encontrada en la Sección 3.

Por otra parte, para realizar la clasificación de un elemento estructural, en alguna de las 5 categorías establecidas, es necesario revisar la Sección 4, en donde se presentan las tablas 2 a la 4, con los valores que deben ser asignados según el escenario que se esté revisando.

Deben considerarse, sin subestimar, las limitaciones mencionadas en la secciones 5, para evitar errores en las clasificaciones o cuantificaciones del nivel de riesgo o tipo de spallig.