



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos  
Canales y Puertos**



**TESIS DOCTORAL**



**DESARROLLO Y ANÁLISIS DE PAVIMENTOS  
INDUSTRIALES DESDE EL PUNTO DE VISTA  
DEL ACABADO SUPERFICIAL**



**Autor**

**ÁLVARO GARCÍA HERNÁNDEZ**

**Directores**

**DANIEL CASTRO FRESNO**

**JUAN ANTONIO POLANCO MADRAZO**

**Santander, Noviembre 2007**

## 2. ASPECTOS BÁSICOS DEL HORMIGÓN HECHO CON CEMENTO PORTLAND

*Este Capítulo tiene como finalidad realizar un estudio previo de la hidratación y la formación de la microestructura del cemento Portland, con el fin de asentar una base teórica para la comprensión y estudio del fraguado del cemento en los Capítulos posteriores. De este modo, se obvian ciertos aspectos que, si bien pueden resultar muy interesantes, no responden a los objetivos marcados para esta investigación.*

*En los últimos apartados, el Capítulo se centra en valorar las fuerzas que influyen en la cohesión inicial de la mezcla, ya que, como se verá, éste es uno de los parámetros que más influyen en el desarrollo de las resistencias del hormigón.*

### 2.1. COMPONENTES PRINCIPALES DEL CLINKER DE PORTLAND

El proceso de fabricación del cemento puede ser simplificado diciendo que éste se produce a través de la interacción química de caliza y sílice a temperaturas de 1400 a 1600 °C, para formar silicatos de calcio primarios [59]. Después de este proceso de calcinación se obtiene un clínker, denominado de Pórtland, que molido fino constituye el componente principal del cemento. Durante esta última etapa, se le añade yeso (u otra fuente de sulfatos) para controlar su temprana reacción de hidratación.

Compuestos		
Nombre	Composición	Abreviación
Silicato tricálcico (Alita)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato bicálcico (Belita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\beta\text{C}_2$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferrito aluminato tetracálcico (Celita)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$
	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\bar{\text{S}}$

**Tabla 2.1: Tabla de óxidos y compuestos del cemento [59].**

Los componentes principales del clínker de Pórtland son los silicatos tricálcico y bicálcico, el aluminato tricálcico y el ferritoaluminato tetracálcico. Los mismos aparecen representados en la Tabla 2.1. Están formados por la combinación de dos o más óxidos principales y forman cristales mixtos en los que entran, como impurezas, otras fases en

cantidades reducidas. En el clínker se encuentran mayoritariamente en estado cristalino, aunque del 2 al 12 % de ellos existen en fase amorfa [172].

La cantidad de cada uno de los óxidos individuales que se combinan para formar los compuestos principales puede conocerse mediante ensayos analíticos rutinarios y la de los componentes mayoritarios puede determinarse mediante los cálculos estequiométricos propuestos por Bogue [37].

De todos los componentes principales, los silicatos suman del 60 al 80 % del total, y son los responsables de las resistencias mecánicas del cemento. En general, estos silicatos no se encuentran puros en el clínker, sino conteniendo pequeñas cantidades de alúmina, magnesia y otros óxidos. Debido a esto, a los silicatos y demás componentes se les suele denominar por su nombre mineralógico: alita, belita y celita.

## 2.2. ASPECTOS QUÍMICOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PÓRTLAND

Con la adición del agua, los componentes del cemento comienzan a hidratarse. Los productos formados son, en su mayoría, silicatos de calcio hidratados (C-S-H), que, a su vez, comienzan a formar una matriz cohesiva o esqueleto microestructural. Esta microestructura masiva, se produce por el aumento progresivo del número de hidratos formados dentro del esqueleto poroso. A medida que la microestructura gana en C-S-H, la mezcla gana en resistencia [31].

Inmediatamente después de la introducción de agua en la mezcla de cemento, se produce un intenso aumento de la actividad química durante un pequeño período de tiempo. Esta actividad ocurre al reaccionar, por ejemplo, el agua con el  $C_3A$ , dando lugar a la aparición de semihidratos cristalinos del tipo  $C_3AH_6$ ,  $C_4AH_9$  y  $C_2AH_8$  y de compuestos más complejos como la etringita [117]. A este período le sigue otro caracterizado por una ausencia de actividad química, en el que se forma una corteza protectora alrededor de las partículas de cemento, que justifica el mantenimiento de la mezcla en estado plástico.

La velocidad de desarrollo de resistencias de los componentes individuales del cemento fue determinada por Bogue y Lerch [38] (Tabla 2.2), aunque según Ramachandran [143], la obtención de estos datos no estuvo basada en un control de ciertos parámetros como la distribución de los tamaños de partículas o el porcentaje de agua en la mezcla. Este autor,

junto con Beaudoin llevó a cabo ensayos similares (Figura 2.1), encontrándose diferencias significativas entre ambos estudios (Tabla 2.2).

	<b>Bogue-Lerch</b>	<b>Ramachandran-Beaudoin</b>
<b>10 días</b>	$C_3S > C_2S > C_3A > C_4AF$	$C_4AF > C_3S > C_2S > C_3A$
<b>40 días</b>	$C_3S > C_2S > C_3A > C_4AF$	$C_3S > C_4AF > C_2S > C_3A$
<b>1 año</b>	$C_3S = C_2S > C_3A > C_4AF$	$C_3S > C_2S > C_4AF > C_3A$

Tabla 2.2: Hidratación relativa de los componentes del cemento [137].

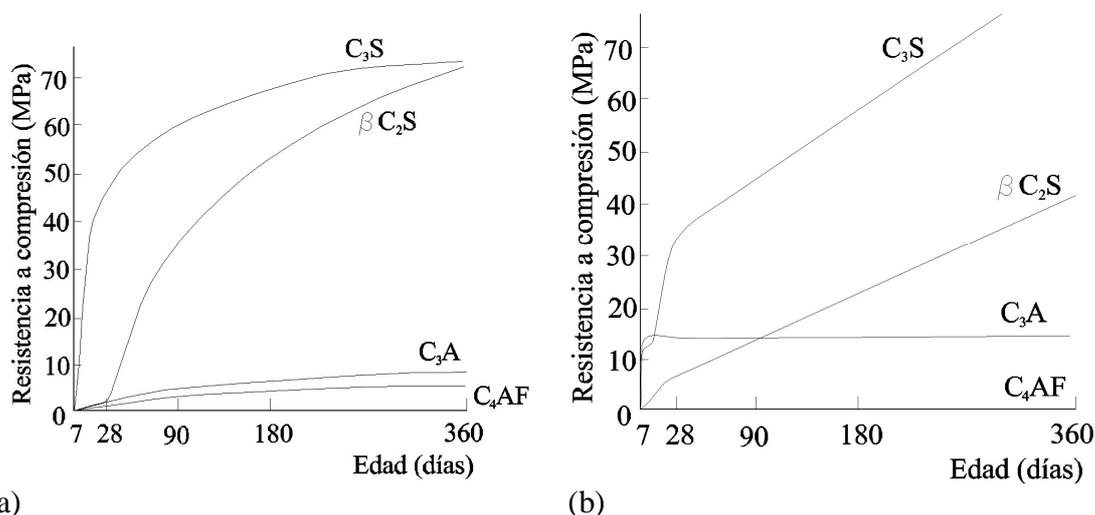
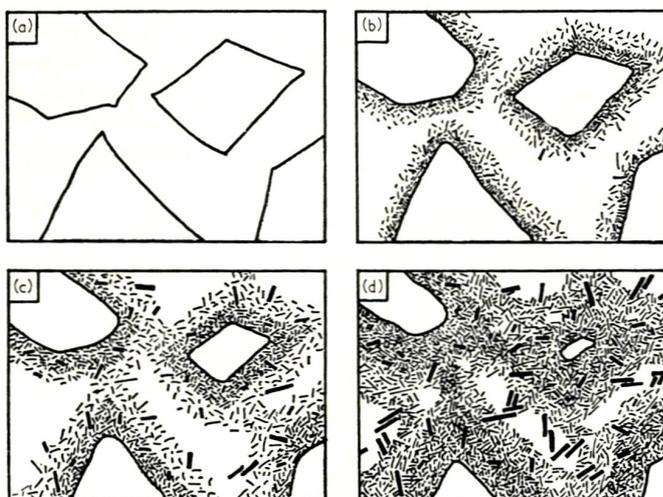


Figura 2.1: (a) Desarrollo de resistencias de cada uno de los componentes del cemento según Bogue y Lerch [38]. (b) Desarrollo de resistencias de cada uno de los componentes del cemento [143].

### 2.3. ETAPAS DE LA HIDRATACIÓN

La hidratación del cemento Pórtland puede ser analizada como la suma de todas las reacciones de los compuestos individuales del cemento, interactuando simultáneamente entre sí. Según Taylor [172], la evolución temporal se puede resumir en los esquemas representados en la Figura 2.2.

La reacción de hidratación es exotérmica, es decir, libera calor y cada componente del cemento libera una cantidad diferente. Por otra parte, el calor total liberado viene condicionado por diversos factores, como la finura del cemento o la mayor o menor presencia de los productos químicos que forman el clínker. La Tabla 2.3 representa los calores de hidratación de los componentes principales del cemento Pórtland.



**Figura 2.2:** Las cuatro fases en el fraguado y endurecimiento del cemento Pórtland: (a) dispersión de los granos de clínker sin reaccionar en el agua, (b) Después de unos minutos, los productos de hidratación crecen hacia dentro y hacia fuera de la superficie de cada grano. (c) Después de unas horas, interaccionan las capas que recubren los diferentes granos de clínker, volviéndose así el conjunto un gel continuo (fraguado). (d) Después de unos días ha surgido una masificación del gel (endurecimiento) [172].

Fase inicial	Producto de reacción	Energía de hidratación (kJ/mol)
$C_3S+(H)$	$C-S-H+CH$	118
$\beta C_2S+(H)$	$C-S-H+CH$	45
$C_3A+(CH+H)$	$C_4AH_{19}$	314
$C_3A+(H)$	$C_3AH_6$	245
$C_3A+(C\bar{S}H_2+H)$	$C_4A\bar{S}H_{12}$ (Monosulfato)	309
$C_3A+(C\bar{S}H_2+H)$	$C_6A\bar{S}_3H_{32}$ (etringita)	452
$C_4AF+(CH+H)$	$C_3(AF)H_6$	203

**Tabla 2.3:** Energía de hidratación de los componentes principales del clínker de portland [172].

En la Figura 2.3 (a), se muestra la evolución de la velocidad de desprendimiento de calor medida en el proceso de hidratación. Justo después de la mezcla, el  $C_3A$ , que es el más activo de los componentes del clínker, reacciona con el agua, disolviéndose  $Ca^{2+}$  y  $OH^-$  de la superficie de los granos, que queda recubierta de una capa de hidrosilicatos, lo que propicia el aumento del pH de la solución y la formación de un gel rico en  $AlO_4^-$ , que a su vez reacciona con los sulfatos en suspensión provenientes de la disolución del yeso utilizado como regulador de fraguado, para dar lugar a cristales de etringita (Figura 2.3 (b)). El fuerte pico que puede verse en la etapa I corresponde a la disolución de  $C_3S$ , que es altamente exotérmica, con lo que hay un rápido incremento de calor que cesa a los 15-20

minutos debido a la formación de una membrana alrededor del  $C_3S$  y el  $C_3A$  por la precipitación de silicato cálcico hidratado insoluble.

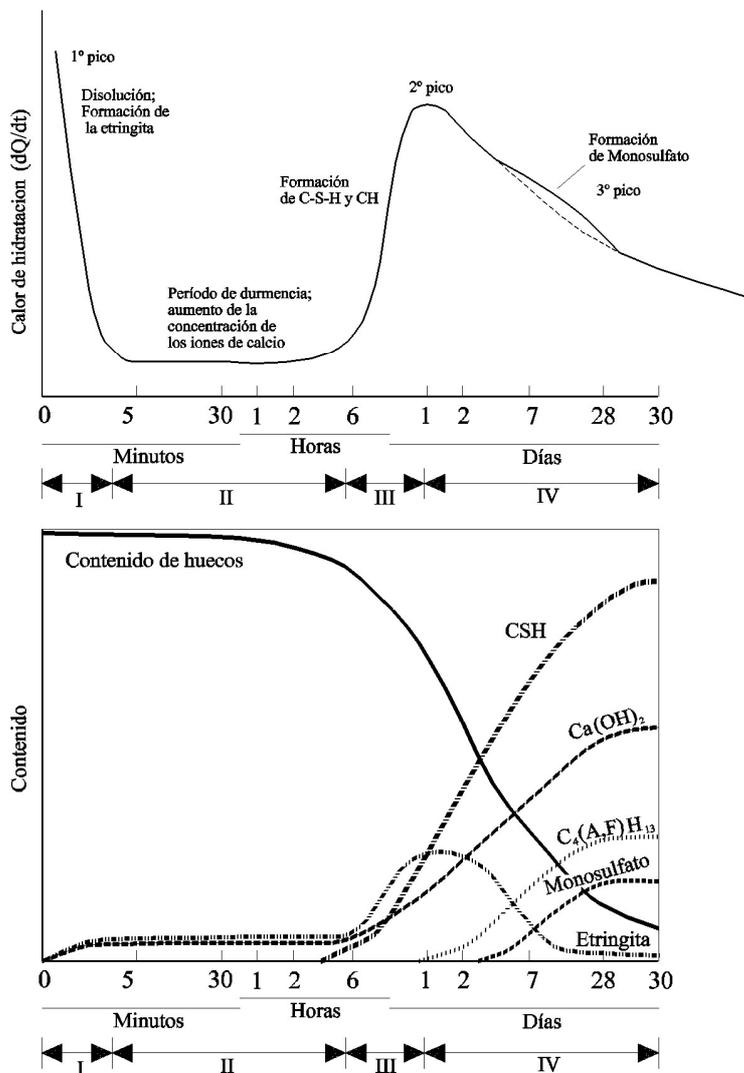


Figura 2.3: Representación de las etapas de hidratación [112].

Este hecho produce en la pasta de cemento lo que se denomina “período durmiente” (etapa II), en donde hay una significativa reducción en la velocidad de los procesos de hidratación. Ello es debido a la formación de una membrana alrededor de las partículas en hidratación que restringe el contacto de éstas con el agua exterior (Figura 2.4). En esta etapa, se origina en la mezcla un aumento en la concentración de iones  $Ca^{2+}$ , que atraviesan la membrana, aumentando su presión interna hasta que, eventualmente, ésta se rompe, lo que provoca una rápida liberación de iones  $SiO_4^{4-}$  en una solución rica en iones  $Ca^{2+}$ . Esto causa una reacción inmediata, con la formación de un gel de C-S-H en forma tubular, que fluye a través de la rotura de la membrana, creciendo a medida que van escapando

productos de hidratación. Este proceso marca el fin de la fase durmiente y va acompañado por la deposición de cristales de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  desde la fase acuosa.

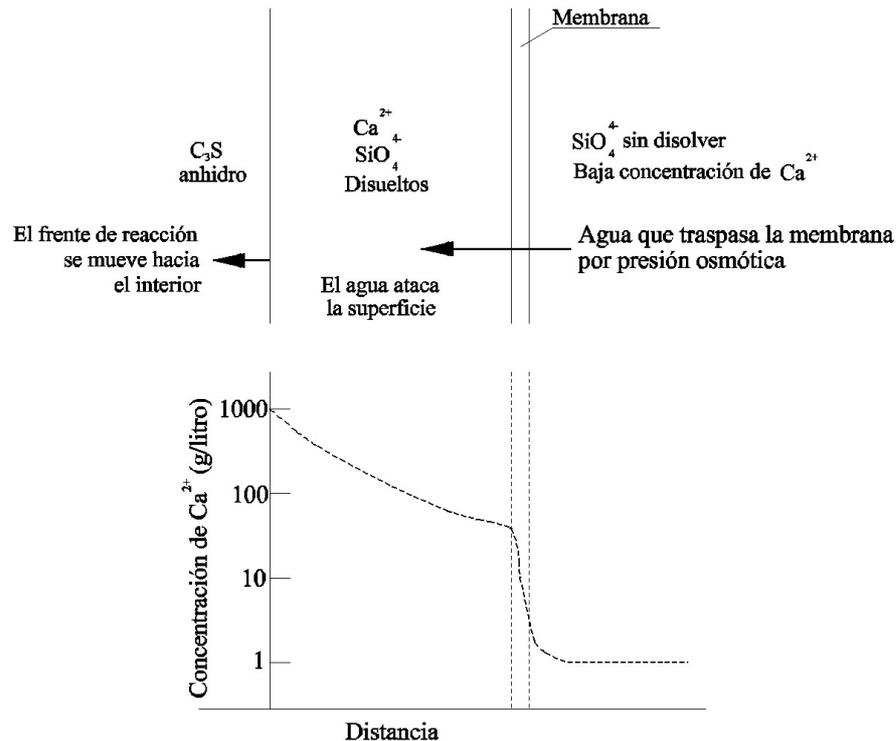


Figura 2.4: Procesos que ocurren durante el período durmiente [169].

La primera parte del período durmiente (un poco más allá de la mitad), corresponde al momento en que la mezcla todavía se puede colocar. A medida que la concentración de los compuestos aumenta, termina el período durmiente, comenzando a formarse los primeros hidratos y como consecuencia la microestructura.

Al final de la etapa II, comienzan a hidratarse la alita y la belita, con la formación de silicato cálcico hidratado e hidróxido de calcio; esto corresponde al inicio de la tercera etapa de hidratación del cemento portland o inicio de fraguado, durante la cual aumentan las resistencias de la mezcla; los granos de cemento reaccionan desde la superficie hacia el interior y la parte anhidra de las partículas va reduciéndose. Al continuar la hidratación del  $\text{C}_3\text{S}$  y del  $\text{C}_3\text{A}$ , aumentando la concentración de sulfatos y aluminatos, se produce un pico de calor en la mezcla que tiene su máximo al final de esta etapa, momento que corresponde al final de fraguado.

Por último, en la cuarta fase, los productos de hidratación forman una densa corteza alrededor de las partículas originales, que actúa como una barrera para la difusión de iones,

disminuyendo la velocidad de reacción. De esta manera, el proceso de hidratación es controlado por la velocidad de difusión de iones a través de los productos de hidratación. El calor de hidratación disminuye proporcionalmente, aunque se muestra un pico en el momento en que la etringita se vuelve inestable y, debido a la alta concentración de aluminatos, reacciona con ellos para convertirse en monosulfato.

### 2.3.1. Estados del agua

Básicamente, los productos de hidratación en una pasta endurecida de cemento Pórtland están compuestos de un gel de tobermorita, pobremente cristalizado y poroso, en el que se encuentran embebidas diversas partículas de hidratos, mejor o peor cristalizados, y de cemento no hidratado. El agua en la pasta saturada se encuentra en tres estados: 1) químicamente combinada; 2) adsorbida físicamente en las superficies del gel tobermorítico y 3) en el espacio externo a la atracción de las fuerzas superficiales.

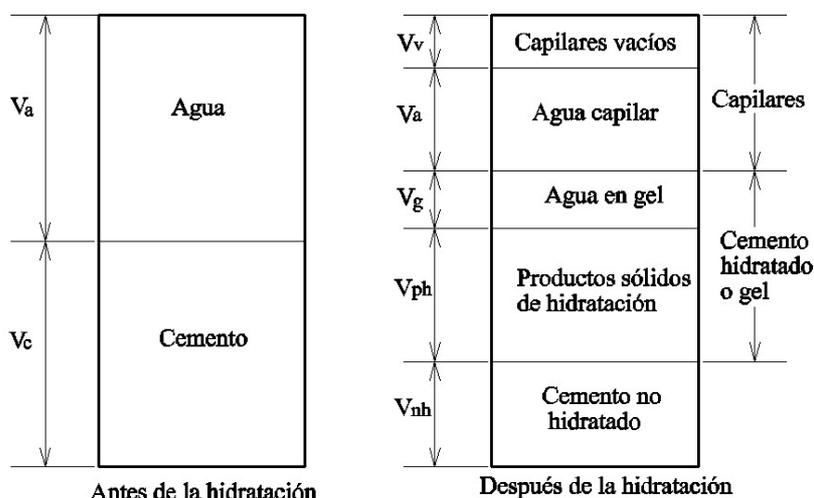
En el hormigón fresco, se puede considerar que, la diferencia de volumen entre los componentes separados y los productos hidratados durante las primeras horas es prácticamente nula; de este modo se tiene que (Figura 2.5):

$$V_{H_2O} + V_c = V_v + V_a + V_{ph} + V_{nh} \quad (2.1)$$

Donde:

- $V_{H_2O}$  = Volumen de agua
- $V_c$  = Volumen de cemento
- $V_v$  = Volumen de vacíos en los poros y capilares
- $V_a$  = Volumen de agua en los poros y capilares
- $V_{ph}$  = Volumen de productos de hidratación sólidos
- $V_{nh}$  = Volumen de productos no hidratados

El agua de hidratación presente en los poros se encuentra saturada de grandes cantidades de iones disueltos. Los principales iones encontrados en el agua son álcalis ( $Na^+$  y  $K^+$ ),  $OH^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ , silicatos y aluminatos. La concentración de los mismos está determinada por el equilibrio con los sólidos de hidratación de baja solubilidad, como por ejemplo el CH y el C-S-H, excepto de los alcalinos, ya que estos son extremadamente solubles y no se encuentran en estado sólido en los primeros días salvo en el caso de los cementos con alto contenido en álcalis [40].



**Figura 2.5:** Representación esquemática de las proporciones volumétricas en la pasta de cemento antes y después de la hidratación [120].

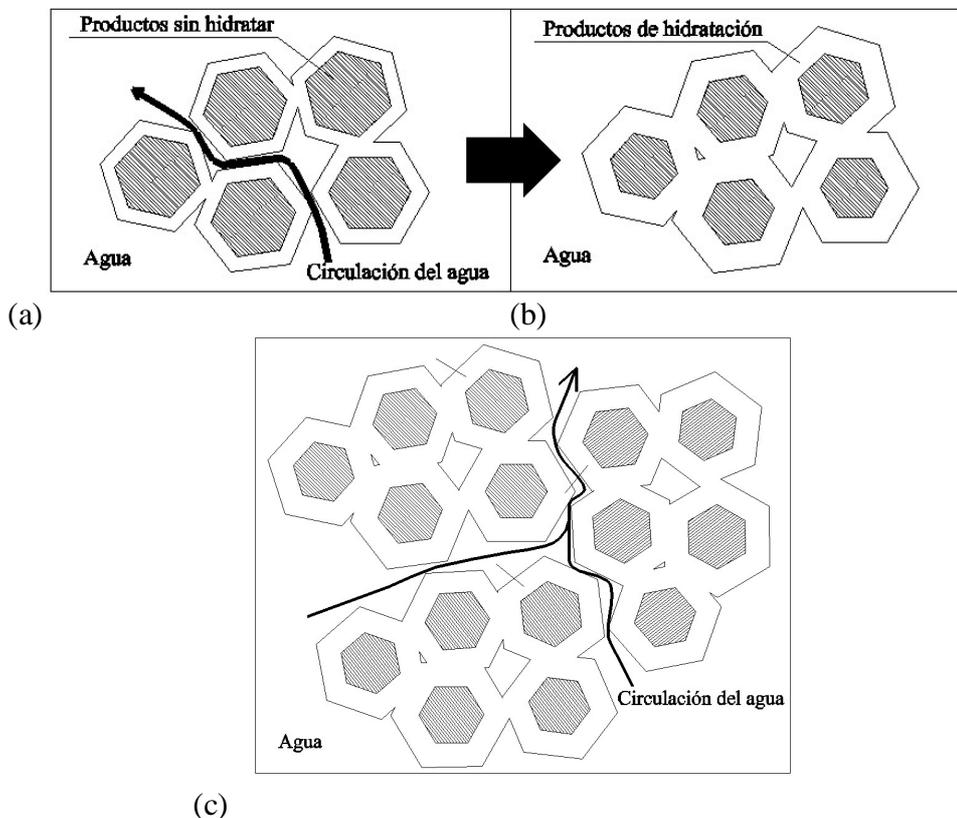
Según Fernández Cánovas [59], “el agua requerida para la hidratación total del  $C_3S$  y del  $C_2S$  es del 24 y del 21 % en peso de cada silicato, respectivamente. Para el  $C_3A$  y  $C_4AF$  se requiere el 40 y 37%”. Estos valores son aproximados, porque es muy difícil saber la estequiometría de las reacciones de hidratación de los componentes activos del cemento, aunque, en general, puede considerarse que el agua total necesaria para la hidratación es de entre el 22-23 % en peso de los componentes anhidros del cemento [166, 144].

#### 2.4. ASPECTOS FÍSICOS DE LA HIDRATACIÓN

El proceso de endurecimiento del hormigón en sus primeras etapas se describe excelentemente mediante la teoría de la percolación [55]. El primero en estudiar estos hechos fue Hammersley [78] en los años 50. Dicha teoría analiza la conectividad de los componentes de un sistema, donde el desorden de los mismos es definido como una variación en su grado de conectividad [142]. El principio de la teoría de la percolación es la existencia de un “umbral de percolación” que se explica de la siguiente manera: Imagínese un sistema de partículas totalmente disperso, donde no existe ningún contacto entre los diferentes componentes del mismo. En este, se dirá que el grado de percolación es 0 ( $P=0$ ). Por otra parte, supóngase que se tiene otro sistema en el que todas las partículas están totalmente conectadas entre sí; en ese caso, el grado de percolación será 1 ( $P=1$ ). Ahora, imagínese que, en el caso en que el grado de percolación es 0, las partículas empiezan a conectarse aleatoriamente entre sí hasta llegar a un punto en que el sistema está unido de un extremo a otro. A este punto, se le llama “umbral de percolación”,  $P_u$  y, por el

contrario, el mismo umbral se puede alcanzar en caso de tener un sistema con un grado de percolación  $P=1$ ; en el que las partículas comienzan a desconectarse aleatoriamente.

*Un ejemplo ilustrativo de la teoría de la percolación es el caso del explorador que quiere cruzar un río en la época de deshielo: si el río se encuentra completamente helado,  $P=1$  y, gradualmente, empieza a hacer más calor, el agua comenzará a arrastrar pedazos de hielo río abajo, hasta que sólo quede un camino utilizable por el explorador. En ese momento, hay sólo una sola conexión entre las dos orillas y  $P=P_u$ . Y lo mismo ocurre a la inversa; cuando el explorador quiere cruzar otro río sin un ápice de hielo,  $P=0$ , durante el invierno siguiente. Para ello, tiene que esperar a que se forme una capa suficiente de hielo que le permita cruzar al menos por un sitio; en ese momento,  $P=P_u$ .*



**Figura 2.6: Percolación de los granos de cemento durante el proceso de hidratación: (a) Los productos de hidratación comienzan a formar una trabazón mecánica entre los productos sin hidratar; (b) Los productos de hidratación forman “fracciones conectadas” de mayor tamaño, que disminuyen el tamaño de los capilares; (c) Debido al mayor tamaño de las “fracciones conectadas”, los capilares disminuyen en número.**

En el caso de la mezcla cementicia, inicialmente, la percolación ocurre de forma aleatoria y aislada, con la formación de una ligazón mecánica entre dos granos. Después surge la

formación de subconjuntos continuos de granos ligados mecánicamente y, por último, la aparición de caminos continuos de granos que unen partes del volumen (Figura 2.6).

Este momento corresponde al paso del estado plástico al estado sólido. A partir de aquí, se manifiestan propiedades como el módulo de elasticidad, la resistencia a compresión, el coeficiente de Poisson, etc., que son parámetros característicos de los sólidos. Ahora es cuando el esqueleto formado puede presentar fisuración, al haberse completado el fraguado de la mezcla. En el hormigón, el fraguado se define como la aparición de rigidez en la masa fresca y precede a la ganancia de resistencia del hormigón, que continúa durante largo tiempo si se presentan las condiciones favorables.

### 2.4.1. Prefraguado

Justo después de mezclar el cemento con el agua, las fases sólidas se encuentran desconectadas o bien conectadas mediante fuerzas de Van der Waals, con lo que la mezcla se comporta como un líquido viscoso-plástico. En ese momento, puede considerarse que las partículas sólidas se encuentran aisladas; presentando los poros existentes una total continuidad [29]. Conforme va teniendo lugar la hidratación, la fracción conectada aumenta gradualmente, hasta que se alcanza el umbral de percolación asociado a un grado de hidratación crítico. Bentz y Garboczi [29] demostraron que, para una pasta pura de  $C_3S$ , existe una dependencia de la fracción de huecos conectada con la relación agua-conglomerante, llegando a la conclusión de que, para relaciones agua-conglomerante mayores que 0.6 siempre existe una fracción de huecos conectada (Figura 2.7).

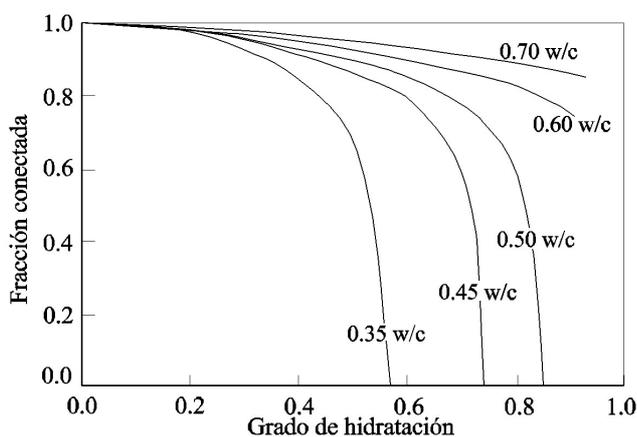
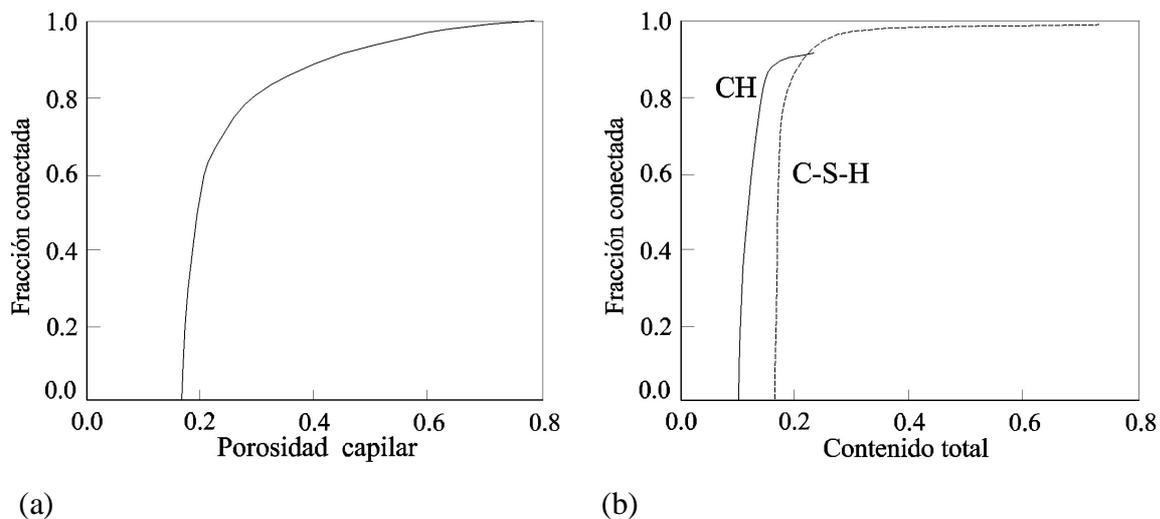


Figura 2.7: Aplicación de la teoría de la percolación a la porosidad del  $C_3S$  puro, mostrando la fracción de porosidad conectada frente al grado de hidratación para varias relaciones agua/conglomerante [29].

La explicación que Garboczi y Bentz [30] dan al hecho de que para relaciones agua/cemento mayores que 0.6 se siga manteniendo una fracción de poros interconectada es que, en estos casos, no hay suficiente conglomerante de inicio que proporcione la cantidad de productos de hidratación necesaria para interrumpir la continuidad de la red de poros capilares.

En la fase sólida poco a poco va aumentando el crecimiento aleatorio de productos de hidratación, con lo que en algunos puntos comienzan a establecer contacto entre sí, especialmente debido a la formación de C-S-H [197]. Es por ello, que el desarrollo de ésta fase determina la rigidez de la pasta. Además, Garboczi y Bentz [29] hallaron una relación entre la porosidad capilar y la fracción de huecos conectada, sugiriendo que esta es independiente de la relación agua/cemento. Según esto, la porosidad capilar de un hormigón con una relación agua/cemento baja, a edades tempranas, es equivalente a la porosidad de un hormigón con una relación agua/cemento alta, tras un tiempo mayor. Puede observarse que el mayor cambio en la conexión entre los poros se produce en el rango de porosidad capilar comprendido entre el 18 y el 40 % (Figura 2.8 (a)).



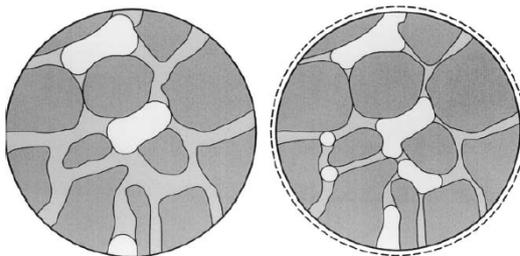
**Figura 2.8: (a) Relación entre la fracción de huecos conectada y la porosidad capilar. (b) Relación entre la fracción conectada de productos de hidratación y el contenido total de estos productos [29].**

Estos autores sugieren que, con la aparición del C-S-H y del CH, el umbral de percolación se supera cuando se forma el 15% de estos materiales. Es decir, en un hormigón, en el momento de inicio de fraguado, se encuentra conectada alrededor de un 15 % de la fase sólida.

Este dato coincide con el calculado de manera matemática por Scher y Zallen [155], que obtuvieron que, para un sistema dado en tres dimensiones, el grado de percolación crítico es del 16 %, así como para uno en dos dimensiones el mismo será del 45 %.

Así, cabe concluir que, durante la hidratación, el tamaño de los poros y la capilaridad disminuyen por efecto del consumo de agua durante las reacciones químicas (no sólo por la hidratación de los componentes principales del clínker, silicatos y aluminatos, sino, también, por la formación de productos de hidratación secundarios como la etringita [92]). El volumen de los hidratos es de 2.2 veces el del cemento anhidro [166]. De este modo, el sistema agua-cemento evoluciona desde un sistema saturado hasta un sistema parcialmente saturado. A esta transición se le denomina fraguado.

Conforme se hidrata el cemento, los productos de reacción ocupan menos espacio que los reactantes (retracción química), dado que el volumen llenado por los hidratos es de 2.2 veces el del cemento anhidro [166]. Los valores típicos de la retracción química son aproximadamente de 6-7 ml/100 g de cemento hidratado [166]. Por otra parte, diversos investigadores [27] han encontrado que, para el mismo grado de hidratación, el mayor tamaño y cantidad de poros corresponden a las temperaturas más altas, lo que hace pensar que a una mayor velocidad de fraguado, el sistema encuentra más dificultad para rellenar los huecos dejados por la formación de los primeros productos de hidratación.



**Figura 2.9: Representación esquemática de una pasta de cemento durante el proceso de hidratación. A la derecha, se representa un bajo grado de hidratación. A la izquierda, se representa un alto grado de hidratación. La materia sólida se representa en gris oscuro, los poros rellenos de agua se representan de gris claro y los huecos vacíos de blanco. La figura muestra como la transformación a mayor tamaño de los poros da lugar a una reducción en el radio de curvatura en los meniscos [92].**

Mientras la mezcla se mantenga fluida, la retracción química se puede absorber en cambios de volumen externos. Cuando se pasa el umbral de percolación, se forman los primeros caminos sólidos a lo largo de la masa, empezando a aumentar su rigidez y, a su vez, las burbujas de aire atrapadas en la misma se transforman en poros mayores (Figura 2.9). Esto

va asociado a cambios en la tensión superficial de los sólidos, las fuerzas de repulsión de los sólidos y la trabazón mecánica entre partículas.

#### **2.4.2. Fraguado**

El fraguado se caracteriza por los tiempos de fraguado, también conocidos como inicio de fraguado y fin de fraguado. Físicamente, el inicio de fraguado es el momento en que la pasta, que es una suspensión viscoelástica-plástica con una pequeña resistencia al corte, pasa a ser un sólido viscoelástico-plástico con una mayor resistencia al corte; es decir, es el momento en que la mezcla deja de ser trabajable [176]. Esta variación es la que se conoce en la ciencia de los polímeros como una transición sol-gel. El fin de fraguado corresponde al momento en que comienza el endurecimiento.

Como se ha comentado en el Apartado 2.4.1, el momento del inicio de fraguado corresponde con la percolación umbral, en el que se habrá formado entre un 15 y un 20 % del esqueleto sólido. Por otra parte, el final de fraguado ocurrirá algo antes de que se produzca el máximo en la velocidad de desprendimiento de calor (Figura 2.3).

Existen diversos ensayos que determinan el inicio y el fin de fraguado. El más utilizado de ellos es el método de penetración de la aguja de Vicat (UNE-EN 196-3) [189] sobre una pasta hecha con el cemento a ensayar y con una cantidad de agua que constituye la que corresponda a la “pasta de consistencia normal”. Esta pasta se determina amasando 500 g de cemento con la cantidad de agua que se estime necesaria, según indica la norma. El principio y fin de fraguado se hallan midiendo lo que penetra una aguja de 1 mm<sup>2</sup> de sección y 50 mm de longitud cargada con una masa de 300 g sobre la pasta de consistencia normal.

Otro método, no tan utilizado en nuestro país, es el ensayo Proctor para morteros y hormigones, recogido en la norma americana ASTM C403 [17] y explicado por Tuthill y Cordon [176], que en España se describe en la norma UNE 83-311 [179]. Este método se basa en el mismo principio de penetración que la aguja de Vicat, pero a mayor escala: en él, el tiempo de inicio de fraguado se define como “el tiempo transcurrido desde el contacto inicial entre el cemento y el agua, para lograr en el mortero tamizado del hormigón una resistencia a penetración de 3.5 MPa”. Por otra parte, el tiempo de final de fraguado se define como “el tiempo transcurrido desde el contacto inicial entre el cemento

y el agua, para lograr en el mortero tamizado del hormigón, una resistencia a la penetración de 27.6 MPa". Para la medida de la resistencia a la penetración, se usa un aparato de resorte graduado de 45 a 580 N con incrementos de 9 N como máximo.

Un método diferente para conocer el inicio de fraguado del hormigón fresco es el indicado por la NT BUILD 476 [135] y se basa en la determinación del principio del fraguado mediante la medida del calor desarrollado en el hormigón durante las primeras horas, definiendo este momento como el tiempo en que se liberan 12.5 kJ de calor por g de cemento. Este momento corresponde con el que se alcanza 3.5 MPa de resistencia a la penetración.

### 2.4.3. Postfraguado

Durante este período, la evolución de las propiedades mecánicas de la mezcla está íntimamente ligada al desarrollo del esqueleto poroso de la pasta de cemento endurecida, como resultado del proceso de hidratación del cemento. Además, durante el proceso de postfraguado, se producen otros fenómenos como la retracción autógena (química) y la retracción de secado, que depende también de la estructura del medio poroso [117].

En el momento del fraguado, se tiene una porosidad inicial ( $P_o$ ) formada especialmente por capilares. Ésta se verá modificada durante el postfraguado por la formación de hidratos. La porosidad final ( $P_f$ ) de la pasta endurecida será, entonces, función de los hidratos formados durante el postfraguado y de las condiciones en las cuales se ha encontrado el hormigón (temperatura, confinamiento, etc.) y, también, del tipo, la reología y la porosidad de dichos hidratos.

## 2.5. VARIACIÓN DE LA PRESIÓN HIDRÁULICA EN LA MASA DURANTE EL FRAGUADO

Tradicionalmente, como se ha explicado en el apartado 2.4.2, los métodos para determinar los tiempos de inicio y final de fraguado se realizan por medios mecánicos, dependientes de la fuerza aplicada y de la geometría del sistema empleado. En el caso del ensayo de Vicat, en el que se garantiza una consistencia inicial constante y donde se utilizan unos parámetros de ensayo fijos, parece lógico pensar que los valores obtenidos corresponderán con los indicados por la teoría de la percolación. Sin embargo, será muy arriesgado

afirmar, como sugiere el ensayo Proctor para hormigones y morteros, que el inicio de fraguado se corresponda con unas resistencias mecánicas dadas; ya que, de esta manera, se está afirmando que el grado de conexión entre los poros o las partículas es directamente proporcional a las resistencias de la masa en un instante dado, y eso, en principio, es incorrecto, porque la resistencia a la penetración en el hormigón, aparte del tamaño del poro, la conexión entre los mismos y la conexión entre las partículas sólidas, dependerá de la composición del material cementante que se esté empleando. Así, será lógico pensar que, el inicio de fraguado dependerá no ya de la resistencia a la penetración de la masa en un momento dado, sino de aquellos factores que influyen en el grado de conexión entre partículas y huecos del hormigón, como de la consistencia inicial del mismo.

De acuerdo con el principio de Terzaghi [93], las tensiones en cualquier punto de una masa de suelo se pueden estudiar a través de las tensiones principales  $\sigma$  que actúan en él. En el caso en que los huecos del suelo se encuentren llenos de agua, las tensiones se repartirán entre el esqueleto sólido y el agua con igual intensidad. De este modo, las sobrepresiones que harán que un suelo se deforme serán:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.2)$$

A este concepto se le denomina tensión efectiva y, en el caso de un material cementoso, se ha encontrado que tanto  $\sigma$  como  $u$  tienen un valor muy parecido, es decir,  $\sigma \approx u$ , o lo que es lo mismo,  $\sigma' \approx 0$  [13, 12].

De este modo, teniendo en cuenta los estudios realizados por Amziane y Andriamananstsilavo [11, 12] sobre el fraguado en muros de hormigón, puede afirmarse que, durante el período previo al inicio de fraguado del hormigón, las presiones son hidrostáticas, definiéndose el inicio de fraguado como el momento en que las presiones laterales y de poro se hacen cero (Figura 2.10). Según estos autores, este concepto sirve para cualquier material que fragüe.

En la Figura 2.10 puede observarse que, en el punto A, la presión será igual a la presión hidrostática del hormigón en ese punto, y que este se encuentra separado un cierto tiempo del origen. Esto es debido a la profundidad de la muestra en el ejemplo; sin embargo, en otros casos mostrados por estos autores, cuanto menor es la profundidad de estudio, menor será también el intervalo de tiempo hasta que se alcanza este punto, con lo que en el caso de un pavimento de hormigón donde la profundidad de la losa será mínima, este punto será

casi instantáneo. Por otra parte, puede verse una diferencia de pendientes entre las rectas AB y BC; que, como más adelante se apuntará, es un efecto debido a la consolidación de la masa por su propio peso, al efecto del vibrado, a la temperatura, y a todos los factores que, en general, hagan que las partículas se aproximen entre sí.

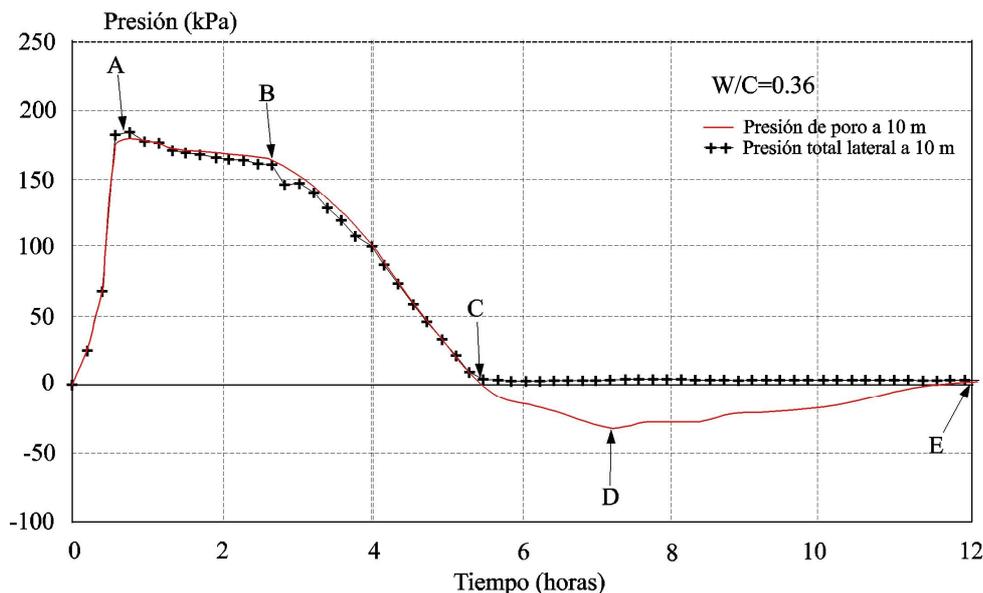


Figura 2.10: Diagrama de evolución de la presión de poro y de la presión total lateral a 10 metros de profundidad [12].

### 2.5.1. Porosidad y exudación del hormigón

La estructura porosa determina la resistencia a la penetración en el hormigón fresco, así como las características resistentes en el hormigón endurecido [59].

La porosidad y la distribución de los poros se determinan, generalmente, usando un porosímetro de mercurio, que funciona introduciendo mercurio en los huecos del hormigón mediante la aplicación de una presión. Esta técnica obtiene medidas para poros mayores de 3  $\mu\text{m}$ .

Estudios realizados por Shi et al. [160] demostraron que, la distribución del tamaño de los poros el hormigón, se puede describir como una suma de tres distribuciones lognormales [23]: La primera de ellas engloba el tamaño y distribución de los poros gruesos (macroporos), que incluye los vacíos del hormigón (de 1000  $\text{Å}$  a 10  $\mu\text{m}$ ). La segunda define la distribución de tamaños de los poros finos (microporos) como, por ejemplo, los

poros del gel (su diámetro típico es de 18 Å). Por último, la tercera cuantifica los poros capilares del hormigón, cuyo tamaño se encuentra entre los dos anteriores (mesoporos).

Los poros más finos se crean en el proceso de hidratación, contribuyendo sólo a un 5 % del volumen total de poros. Sin embargo, en término de número de poros, estos representan aproximadamente el 99 % [149]. La mayoría de ellos, se encuentran aislados o son demasiado finos, así que, en realidad, sólo tiene sentido considerar aquéllos que se sitúan en el rango de poros accesibles por el porosímetro de mercurio.

Cuando se compacta el hormigón fresco, el agua tiende a ascender hacia la superficie. A este fenómeno se le denomina exudación. Como más adelante se expondrá, ésta ocurre por la migración del agua a la superficie debida a la recolocación de las partículas sólidas conectadas con la composición del hormigón, fenómeno que tiene lugar, bien por el propio peso del hormigón, o por el efecto del vibrado sobre las partículas del mismo.

Como se explicó en el apartado 2.4.1, la evolución de la porosidad en un hormigón se explica mediante la teoría de la percolación, según la cual la exudación en el hormigón desaparecerá, en gran medida, cuando se traspase el umbral crítico de percolación, que es de aproximadamente el 16 % de los poros conectados [155].

La tensión superficial tiene un cierto efecto sobre la exudación. El agua sube a través de los poros debido al efecto de capilaridad. Sin embargo, ésta nunca podrá llegar más allá de los límites de los poros; es decir, nunca se podrá formar un charco en la superficie del hormigón por efecto de la capilaridad. En un ambiente en el que la humedad atmosférica sea del 100 % no se producirá la evaporación del agua, con lo que, una vez que el agua ha alcanzado por capilaridad la superficie del hormigón, ésta se mantendrá ahí. Por contra, en el caso en que la humedad ambiental sea inferior al 100 %, se producirá la evaporación del agua en la superficie, con lo que habrá una continua migración de agua del interior del hormigón hacia la superficie. En el caso en que la evaporación sea mayor que la migración del agua a la superficie, se producirá la desecación de la misma, con su consiguiente cuarteamiento.

En la determinación de la exudación sólo se tiene en cuenta el líquido que fluye a través de la red de poros conectados; por lo tanto, es la estructura de la red conectada y no el tamaño de los poros y su distribución lo que controlan la exudación. Generalmente se acepta que sólo los poros de un determinado tamaño contribuyen a la permeabilidad. El punto de inflexión en la distribución de poros se determina mediante el porosímetro de mercurio,

que indica el mínimo diámetro de poros que son continuos a través de toda la pasta [74, 86].

Por otra parte, en la exudación hay que tener en cuenta el potencial osmótico, ya que este tiene un gran efecto en la eliminación del agua superficial del hormigón: A medida que progresa el proceso de hidratación, el agua que se encuentra en el interior del hormigón va cargándose de iones mientras que el agua que se encuentra en la superficie permanece a un nivel constante. Una vez que finaliza el efecto de la preconsolidación causado por la vibración del hormigón, el agua superficial será reabsorbida por un diferencial osmótico vertical.

## 2.6. HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PÓRTLAND

El parámetro grado de hidratación ( $\alpha$ ), es una medida de lo avanzada que está la reacción entre el agua y el cemento. Cuando  $\alpha$  posee el valor 0, esto implica que aún no ha comenzado el proceso de hidratación; mientras que el valor 1 indica que el proceso de hidratación está finalizando.

Desde el punto de vista teórico, no es posible describir completamente el proceso de hidratación del cemento por medio de un único grado de hidratación, considerando las numerosas reacciones que ocurren simultáneamente. Desde el punto de vista práctico, será suficiente con la determinación del grado global de hidratación para todas las reacciones.

En cuanto a la determinación del grado de hidratación, Byfors [43], lo definió como la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{\text{Cantidad de cemento hidratado}}{\text{Cantidad total de cemento}}, \alpha \in [0,1] \quad (2.3)$$

Otra manera de obtener directamente el grado de hidratación es conociendo la cantidad de agua ligada en el tiempo:

$$\alpha = \frac{\text{Cantidad de agua usada en un tiempo } t}{\text{Cantidad de agua usada en el tiempo } t = \infty} = \frac{W_n(t)}{W_n(t = \infty)}, \alpha \in [0,1] \quad (2.4)$$

En la ecuación (2.4),  $W_n(t=\infty)$  representa la cantidad de agua usada para la hidratación total del cemento. Un valor aproximado para  $W_n(t=\infty)$  es el propuesto por Laplante [108]:

$$W_n(t=\infty) = 0.25 \times \text{Cantidad total de cemento} \quad (2.5)$$

Intervalos de temperatura (°C)	Productos en descomposición
105	Evaporación del agua
105-380	Evaporación del agua de los silicatos y aluminatos hidratados
380-600	Evaporación del agua de la cal hidratada
600-750	Descarbonatación de la calcita (forma más estable de los productos de hidratación)
750-1050	Evaporación del agua de los productos secundarios de hidratación

**Tabla 2.4: Evaporación del agua del cemento hidratándose [50].**

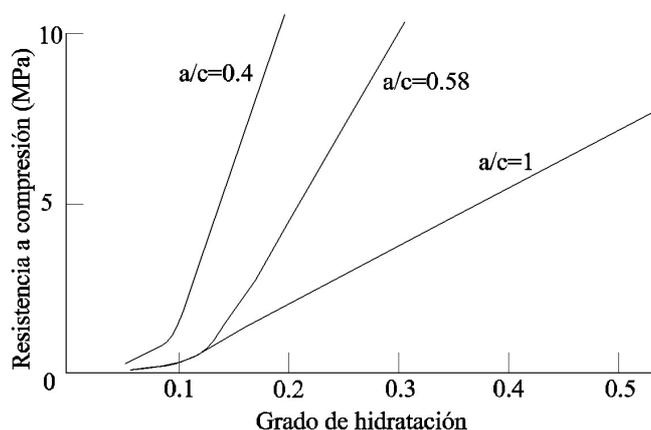
Aunque técnicamente es imposible extraer del hormigón el agua que ha sido usada en el proceso de hidratación, ésta es generalmente asimilada a cantidades de agua no evaporada, que puede ser eliminada al someter a una pasta de cemento totalmente hidratada a un análisis termogravimétrico entre 105 y 1050 °C [50] (Tabla 2.4). Éste consiste en pesar continuamente la muestra sometida a una temperatura creciente, generalmente lineal, programada en función del tiempo, lo que permite que sea seguida la evolución de su peso en una atmósfera controlada. Dichas variaciones ponderales son debidas a procesos de deshidratación generados en la muestra y permiten conocer las cantidades de agua ligadas a los diferentes compuestos presentes (Tabla 2.4).

Copeland [50] mostró que el grado de hidratación de una pasta de cemento con relación a la cantidad de agua no evaporada, obtenido por medio de técnicas directas y por análisis termogravimétrico, presenta una correlación 1:1.

Otra forma de obtener el grado de hidratación es a partir del calor generado por las reacciones de hidratación [106, 190, 191], que son fuertemente exotérmicas, con lo que el calor desprendido es un parámetro significativo para describir la evolución del grado de hidratación. Una expresión que se propone es:

$$\alpha = \frac{\text{Cantidad de calor generado en un tiempo } t}{\text{Cantidad de calor generado en el tiempo } t = \infty} = \frac{Q(t)}{Q(t = \infty)}, \xi \in [0,1] \quad (2.6)$$

Por otra parte, numerosos estudios destacan que existe una relación entre la resistencia a compresión, el calor producido y el grado de hidratación [43,168]. Ésta es no lineal en el comienzo de la hidratación, pero luego se torna lineal (Figura 2.11). Los trabajos realizados por Byfors [43] muestran un trecho inicial sin resistencia, seguido por un pequeño tramo no lineal y después otro lineal, con lo que en palabras suyas: "... The relation between strength and the degree of hydration is, however, exponential at a very early stage, from the setting phase and a few hours after". Este comportamiento exponencial viene también recogido en la norma ASTM C 403 [17].



**Figura 2.11: Relación entre el grado de hidratación y la resistencia a compresión para diferentes relaciones agua/cemento [43].**

Como se explicará en el Apartado 3.5, este comportamiento, primero no lineal y posteriormente lineal, es indicativo de la existencia de dos parámetros que influyen en la resistencia del hormigón: en primer lugar, la existencia de una serie de fuerzas capilares causadas por los efectos de tensión superficial y succión del agua entre las partículas que componen la masa y, por otro lado, la fuerza de unión provocada por la hidratación de las partículas de cemento.

Que la relación sea no lineal al principio significa que en ese momento, las fuerzas de tensión capilar son parecidas a las fuerzas de cementación, mientras que en el momento en que la relación se torna lineal, las fuerzas preponderantes serán las resistentes debidas a la hidratación del cemento, que siguen una ley exponencial [43].

Por último, en la Figura 2.12, se presenta la evolución del grado de hidratación en el tiempo. En ella se observa cómo los diferentes períodos en la evolución del fraguado del

hormigón en el tiempo pueden ser relacionados mediante el grado de hidratación por una curva que puede ser ajustada de la siguiente manera [65]:

$$\alpha(t) = \alpha_u e^{-\left(\frac{\tau}{t}\right)^\beta} \quad (2.7)$$

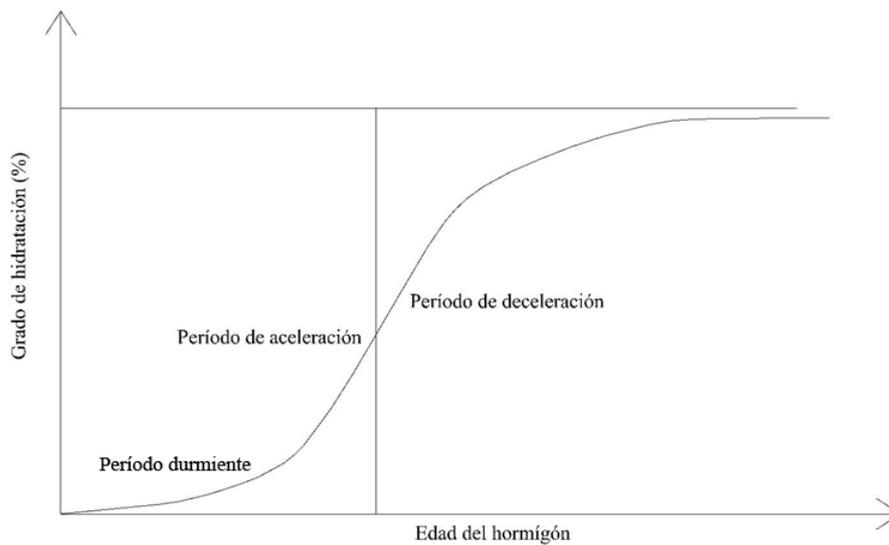
Donde:

t = Edad

$\tau$  = Constante de tiempo (edad en que la resistencia ha alcanzado el 37% de la resistencia última)

$\beta$  = Parámetro de crecimiento de la curva (Parámetro función de la velocidad de hidratación)

$\alpha_u$  = Grado último de hidratación



**Figura 2.12: Interpretación física del desarrollo del grado de hidratación [65].**

En la Figura 2.12, que tiene forma de S, se observan dos intervalos en la variación del grado de hidratación del hormigón: un período de aceleración y otro de deceleración. La transición entre ambos corresponde con el máximo de calor de hidratación de la Figura 2.3 (b). Existen también estudios [194] que muestran cómo en este momento existe también un máximo en la tasa de crecimiento de la conductividad de la masa de hormigón.

## 2.7. FUERZAS ENTRE PARTÍCULAS EN LOS PRIMEROS MOMENTOS DE LA HIDRATACIÓN

El hormigón fresco, que básicamente se encuentra formado por agua, cemento y áridos, puede ser entendido como un entramado de partículas de tamaño y forma irregular con los

espacios entre ellas rellenos de agua y aire. La mayoría de las partículas en el hormigón fresco se encuentran en contacto con las partículas alrededor suyo, incluso aquéllas que se encuentran en suspensión en el agua de mezclado, pues al moverse sufren choques con el resto. Zhuguo Li et al. [201] propusieron la ecuación (2.8) para mostrar la relación entre el máximo esfuerzo normal aplicado al hormigón y el esfuerzo cortante en el mismo (Figura 2.13):

$$\tau = \sigma_n \tan(\theta_m + \phi_m) + \frac{1}{b} N f_{wm} \tan(\phi_m) + \frac{1}{b} K f_{em} \quad (2.8)$$

Donde:

$$b = \cos \theta_m (1 - \tan \theta_m \tan \phi_m)$$

N = Número de partículas consideradas en el sistema.

K = Número de partículas móviles.

$f_{cm}$  = Fuerza media de unión entre las partículas debida a la tensión superficial.

$\theta_m$  = Ángulo entre el plano de contacto de las partículas y la principal dirección de corte

$\phi_m$  = Ángulo de rozamiento interno.

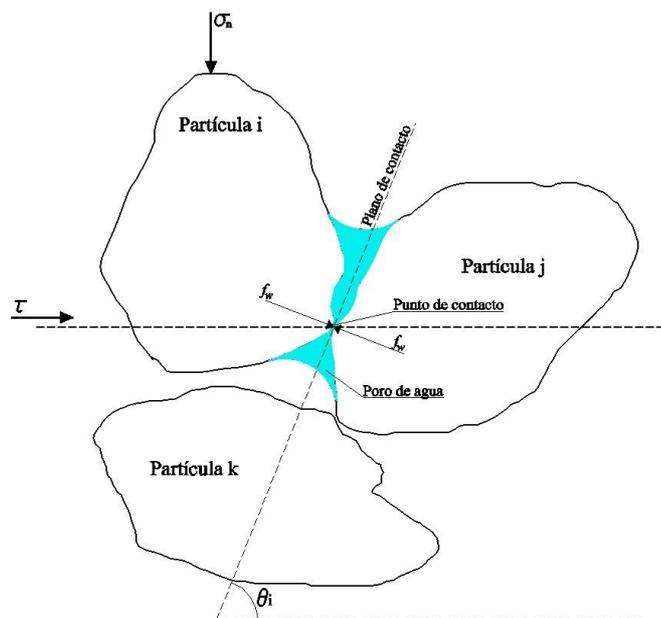


Figura 2.13: Ángulo de contacto entre las partículas [200].

De la Ecuación (2.8) puede deducirse que el esfuerzo cortante último del hormigón depende especialmente del ángulo de rozamiento interno entre las partículas, es decir, de si los áridos son lisos o rugosos (Figura 2.14 (a)), de la velocidad de fraguado (el ángulo de

rozamiento interno aumentará más o menos con el transcurso del tiempo en función de los factores que determinan la velocidad de fraguado del cemento (relación agua-cemento, temperatura, tipo de cemento, etc.) (Figura 2.14 (a)), de la tensión superficial ejercida por el agua, del diámetro de las partículas, de la temperatura del agua en ese instante o de la cantidad de agua entre las partículas, que podría hacer que estuvieran más o menos separadas (Figura 2.14 (b)).

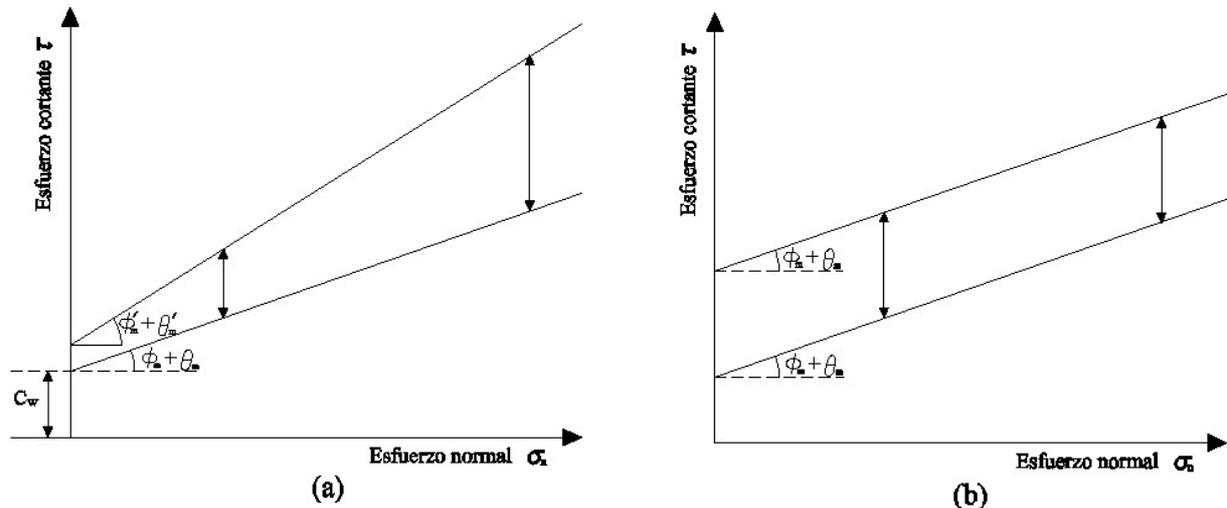


Figura 2.14: Esfuerzo cortante último frente a tensión normal aplicada.

### 2.7.1. Tensión capilar

La tensión capilar se refiere a las tensiones que sirven de unión entre partículas debido a los efectos de presión negativa de poro (succión) y a la tensión superficial. El efecto visible de la tensión capilar es la tendencia de las partículas a ser atraídas unas por otras, de manera similar a lo que ocurre en caso de someter a un sistema no saturado a una sobrecarga.

En física se denomina tensión superficial al fenómeno por el cual la superficie de un líquido tiende a comportarse como si fuera una delgada película elástica [60].

Dentro de un líquido, alrededor de una molécula actúan atracciones simétricas, pero en la superficie, una molécula se encuentra sólo parcialmente rodeada por moléculas y, en consecuencia, es atraída hacia adentro del líquido por las moléculas que la rodean. Esta fuerza de atracción tiende a arrastrar a las moléculas de la superficie hacia el interior del

líquido (tensión superficial), y al hacerlo el líquido se comporta como si estuviera rodeado por una membrana invisible.

Termodinámicamente la tensión superficial es la tendencia de un líquido a disminuir su superficie hasta que su energía de superficie potencial sea mínima, condición necesaria para que el equilibrio sea estable. Como una esfera presenta un área mínima para un volumen dado, entonces por la acción de la tensión superficial, la tendencia de una porción de un líquido lleva a formar una esfera o a que se produzca una superficie curva o menisco cuando está en contacto un líquido con un recipiente.

Por otra parte, la tensión superficial disminuye con la temperatura, ya que las fuerzas de cohesión disminuyen al aumentar la agitación térmica, como se muestra en la ecuación empírica de Ramsay-Shield's [146]:

$$\Gamma = \alpha \left( \frac{\rho}{M} \right)^{2/3} (T_c - T - \delta) \quad (2.9)$$

Donde:

- T = Temperatura.
- T<sub>c</sub> = Temperatura crítica del agua.
- α = Constante.
- ρ = Densidad del agua.
- M = Peso molecular del agua.

Teniendo en cuenta que la densidad varía con la temperatura, podría ser lógico suponer que no existe una relación completamente lineal entre la tensión superficial y la temperatura. Sin embargo, como los cambios de volumen del agua por la temperatura son prácticamente despreciables en el rango en que se colocará el hormigón, se puede concluir que la relación es prácticamente lineal.

El término succión fue usado por primera vez por Schofield [158] refiriéndose a suelos, para representar la diferencia de presión en el agua de poros de algunos suelos (saturados o no), que tenían la capacidad de absorber agua si esta se adicionaba a presión atmosférica. El término succión o potencial de agua designa a la integrante del estado de tensiones que tiene en cuenta aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructura de un suelo. Sin su participación resulta imposible definir el estado tensional y entender la respuesta deformacional de un suelo parcialmente saturado.

La diferencia entre presión de aire de poros y presión de agua de poros se define como succión matricial [93]. El valor de esta succión matricial depende de la tensión superficial y el radio de curvatura del menisco. Cuando el grado de saturación disminuye, el menisco se retrae en espacios de poros pequeños, donde el radio de curvatura del menisco se reduce y, de esta manera, la succión matricial se incrementa. En el hormigón, debido a la disminución del tamaño de poros, se desarrollan succiones más altas con el tiempo.

Por otra parte, el flujo del agua a través del hormigón o exudación se controla por el gradiente del potencial de agua total. El potencial de agua total puede expresarse como la suma de tres componentes:

- Potencial gravitacional, causado por la elevación del agua del suelo con respecto a un nivel de referencia.
- Capilar o potencial matricial, causado por efectos de tensión de superficie.
- Potencial osmótica, causado por la concentración de iones disueltos en el agua del hormigón.

En el caso del hormigón, durante el proceso de endurecimiento, el potencial matricial está dado por la succión matricial, multiplicada por la densidad del agua. Por analogía, el potencial osmótico dividido por densidad del agua es llamado succión osmótica [93]. La suma de la succión matricial y la succión osmótica es la succión total.

Siguiendo con la analogía de los suelos, evidencias experimentales sugieren que la resistencia al corte y el comportamiento del cambio de volumen de suelos no saturados son dependientes de la succión matricial más que de la succión total [5]. De esta manera, en el hormigón, al igual que en el caso de suelos, el comportamiento de tensión-deformación depende de la succión matricial, mientras que el flujo de agua dependerá del gradiente de la succión total más los efectos gravitacionales.

Por otra parte, cabe decir que, en el caso de que el hormigón se encuentre saturado, la presión de poro será positiva; sin embargo, cuando el cemento comienza el proceso de fraguado, es decir, cuando el sistema pasa de ser saturado a no saturado, puede considerarse que la presión de poro comienza a ser negativa, con lo que se dice que existe una succión entre las partículas [12]. En definitiva, las succiones son las presiones negativas que se producen por encima del nivel freático, usándose este término para representar la diferencia entre la presión del aire y la del agua.

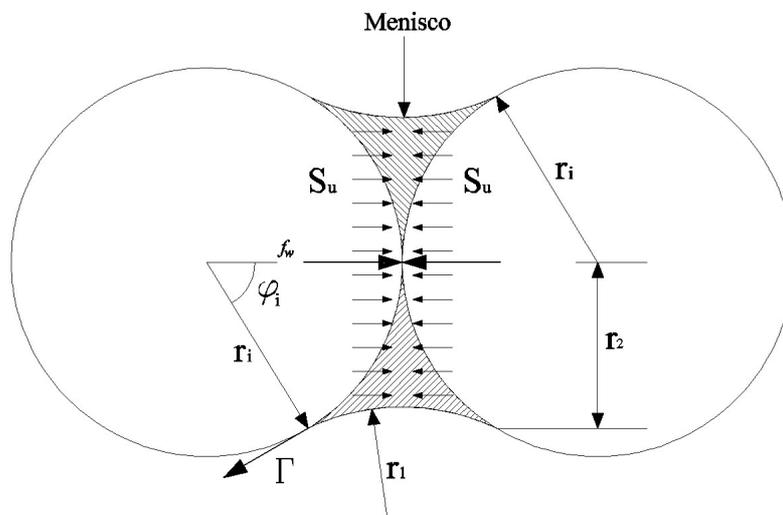
De este modo, debido a la tensión superficial presente en los poros, existirán una serie de fuerzas de unión entre partículas perpendiculares al plano de contacto de las mismas (Figura 2.15). Esta fuerza de unión ( $f_{wi}$ ), dependerá del tamaño de las partículas, del ángulo de contacto  $\varphi_i$  de la membrana de agua y de los radios de curvatura ( $r_1$ ,  $r_2$ ). La fuerza  $f_{wi}$  es dada para dos esferas en contacto por (2.10) [111, 201].

$$f_{wi} = f_{ws} + f_{wt} = \pi r_2^2 S_u + 2\pi r_2 \Gamma = \frac{2\pi r_1 \Gamma}{1 + \tan(\varphi_i / 2)} \quad (2.10)$$

Donde:

$f_{ws}$  = Componente de la fuerza causada por la succión.

$f_{wt}$  = Componente de la fuerza causada por la tensión superficial del poro de agua.



**Figura 2.15: Fuerzas entre partículas causadas por la tensión superficial y la succión en los poros de agua [201].**

Si ahora se consideran las partículas del hormigón como esferas de radio medio  $r_m$ , la fuerza media que se tiene entre ellas es [201]:

$$f_{wm} = \frac{2\pi r_m \Gamma}{1 + \tan(\varphi_m / 2)} \quad (2.11)$$

Donde:

$r_m$  = Radio medio de las partículas del hormigón.

$\varphi_m$  = Ángulo medio de la membrana de agua.

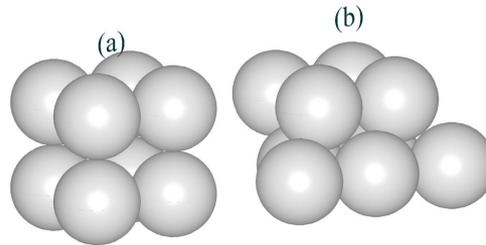
### 2.7.2. Influencia del vibrado

Mediante el vibrado se vencen las fuerzas cohesivas del hormigón, transformándolo en un fluido que se adapta perfectamente a las formas de los moldes. Como se ha dicho, estas fuerzas cohesivas son tanto más elevadas cuanto más secos son los hormigones (succión), de forma que con el vibrado se introducen presiones positivas que, de ser más grandes que la succión, convertirán al hormigón en un líquido. De esta forma, al proporcionar una sobrepresión al sistema agua-cemento-áridos, se produce también una recolocación de las partículas hacia su configuración más resistente, con una menor relación de vacíos y una disminución de la cantidad de poros, ya que el aire tiende a ascender al tener menos densidad que el sistema y al haber sido reducidas o eliminadas las fuerzas entre las partículas [59].

En la Figura 2.16 se muestra una simplificación del sistema agua-cemento-áridos, considerando que todos los elementos del mismo son perfectamente esféricos y se agrupan mediante una serie de sistemas de empaquetamiento idealizados. En la Figura 2.16 (a), se representa un sistema de empaquetamiento cúbico, en el que cada esfera se encuentra en contacto con otras seis. Cada capa de esferas se encuentra separada de la anterior por una distancia  $2R$ , donde  $R$  es el radio de cada esfera, su relación de vacíos es de 0.91 y su porosidad del 47.6% [111]. Sin embargo, en la Figura 2.16 (b) se muestra un grado de empaquetamiento tetraédrico, en el que cada esfera se encuentra en contacto con otras 12, el espaciado entre ellas es de  $2/3 R$ , su relación de vacíos es de 0.34 y su porosidad es del 26% [111]. De este modo, si se considera que la Figura 2.16 (a), corresponde a un sistema en el momento previo a la vibración y que la Figura 2.16 (b) representa el momento posterior a la vibración, se entiende cómo el proceso de vibrado consigue una mayor compacidad de la masa y una eliminación de aire de la misma.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que estas deformaciones inducidas por la vibración del hormigón no son recuperables: una vez que se adopta la nueva configuración no se vuelve a recuperar la anterior. De esta manera, cabe decir que, mediante el proceso de vibración se provoca que el sistema adopte deformaciones plásticas, aumentando las presiones internas del hormigón por la reconfiguración del sistema de partículas y expulsando el agua al exterior. Esta, junto al asentamiento de las partículas debido a su peso propio, es la causa de la exudación, que se producirá hasta el momento en que las deformaciones producidas por el efecto del fraguado del cemento sean mayores que las

provocadas por el vibrado del hormigón; es decir, hasta el momento en que en una curva tensión-deformación se pase de una rama de preconsolidación o elástica a una rama noval.



**Figura 2.16: Geometrías idealizadas de grano para esferas uniformes. (a) Empaquetamiento cúbico de las esferas. (b) Empaquetamiento tetraédrico de las esferas**

De esta manera, se deduce que la exudación será menor en los casos en que haya una buena distribución de tamaño de las partículas, que se empleen materiales más finos o en el caso de hormigones muy fluidos, donde este efecto podría llegar prácticamente a desaparecer [118].

## 2.8. DESARROLLO DE RESISTENCIAS EN EL HORMIGÓN CON EL TIEMPO

Existen diferentes funciones de madurez que indican tanto la variación de las resistencias o el grado de hidratación del hormigón con el tiempo. Dos modelos que se usan habitualmente son de distribución lineal y parabólica, ambos desarrollados por Knudsen [103, 104] (Ecuaciones (2.12) y (2.13)); la diferencia entre ambas funciones se describe en términos de cinética de hidratación de las partículas de cemento. La ecuación (2.12) [103] considera que el grado de hidratación de una partícula individual de cemento es una función lineal del producto del tiempo por una constante; Carino [44], explicó la función de la siguiente manera: “Se asume que la función comienza a adquirir resistencias a  $t=t_0$ ,  $S_u$  es el valor asintótico de la resistencia límite y los valores de  $k$ ,  $S_u$  y  $t_0$ , se averiguan a partir de la curva de evolución de las resistencias en el tiempo”.

$$S = S_u \cdot \frac{\beta \cdot (t - t_0)}{1 + \beta \cdot (t - t_0)} \quad (2.12)$$

Donde:

$S_u$  = Resistencia última

$\beta$  =  $S_u/S_{28}$

$t_0$  = Edad el inicio del desarrollo

$t$  = Edad del hormigón

El modelo parabólico, como se muestra en la ecuación (2.13), considera que el grado de hidratación es una función de la raíz cuadrada del producto del tiempo por una constante [46]. De acuerdo con Bentz [31], la ecuación (2.13) ofrece un mejor ajuste con respecto a los datos experimentales. Esta ecuación no es válida para edades tempranas de hidratación ( $0 < \alpha < 0.15$ ), pero es apropiada para modelar cuando  $\alpha > 0.15$  [104]; aunque Bentz sugirió que la ecuación (2.12) podría ser apropiada para modelar valores con un grado de hidratación mayor que 0.1 ( $\alpha > 0.1$ ).

$$S = S_u \cdot \frac{\sqrt{\beta \cdot (t - t_0)}}{1 + \sqrt{\beta \cdot (t - t_0)}} \quad (2.13)$$

Freiesleben, Hansen and Pedersen [65], propusieron el siguiente ajuste experimental para el desarrollo de las resistencias del hormigón durante su curado isoterma:

$$S = S_u e^{-\left(\frac{\tau}{t}\right)^\alpha} \quad (2.14)$$

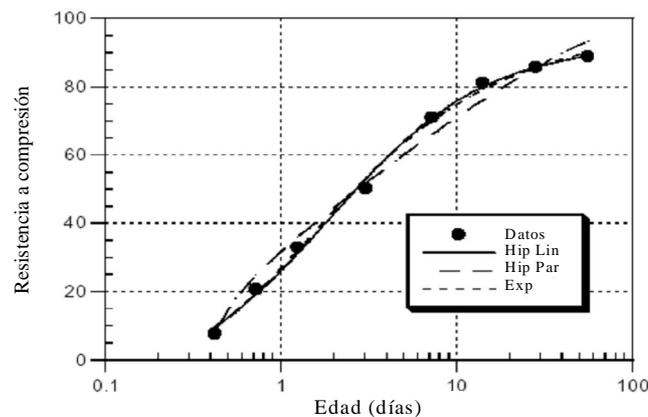
Donde:

$S_u$  = Resistencia última

$\tau$  = Edad en que la resistencia es  $0.37 S_u$

$\alpha$  = Factor de forma

$t$  = Edad del hormigón



**Figura 2.17: Modelización de las resistencias a compresión en el tiempo mediante los tres métodos explicados [46].**

Carino y Lew [46] (Figura 2.17), hicieron una comparación de las curvas representadas en las ecuaciones (2.12), (2.13) y (2.14) llegando a la conclusión de que la ecuación (2.12) es un buen modelo para la adquisición de resistencias a 28 días, pero no más, la ecuación (2.13) parece ser un buen modelo para las edades más tardías, mientras que la ecuación (2.14) se ajusta bien a la adquisición de resistencias a todas las edades.