



\*\*\*\*\*

**EL ENFRIAMIENTO  
DEL HORMIGÓN**

\*\*\*\*\*

**MARIANO LARA JURADO**  
Ingeniero Frigorista I.F.F.I.

**INGENIERÍA Y EQUIPAMIENTOS, S. A.**  
C/ Compositor Wagner, 6  
08191 Rubí (BARCELONA)  
Tel. 93.2632484 Fax. 93.2633019  
[mlara@inesa.es](mailto:mlara@inesa.es)

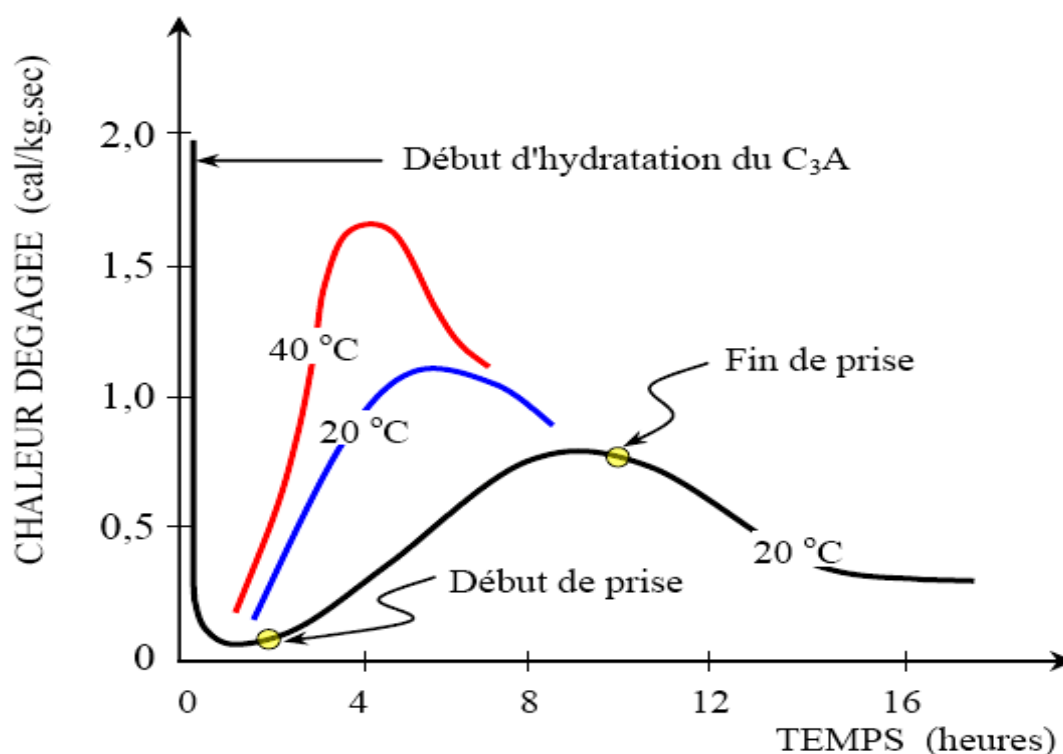
## EL ENFRIAMIENTO DEL HORMIGÓN

### 1. LAS RAZONES PARA ENFRIAR HORMIGÓN

Los cementos son mezclas de silicatos y aluminatos cálcicos anhídrido. Cuando ellos se ponen en presencia del agua, en la mezcla obtenida tienen lugar complejas reacciones de hidratación e hidrólisis y la cristalización se manifiesta en el fraguado y después en el endurecimiento de la mezcla agua - cemento. La hidratación es una reacción fuertemente exotérmica (ver *figura 1*). El calor de reacción llamado “calor de hidratación” se expresa en calorías liberadas por gramo de cemento al cabo de  $n$  días; generalmente a 7 días. El calor de hidratación de un cemento depende de:

- el tipo y composición de éste.
- la finura de molienda.

Éste puede variar entre 40 a 120 cal/g en 7 días.



*Figura 1. Calor liberado durante la hidratación del cemento Portland.*

El hormigón es una mezcla de cemento, agua, arena y áridos. Desde el inicio del fraguado la temperatura de todo el volumen aumenta debido a la hidratación del cemento. Esta elevación de temperatura del hormigón depende de:

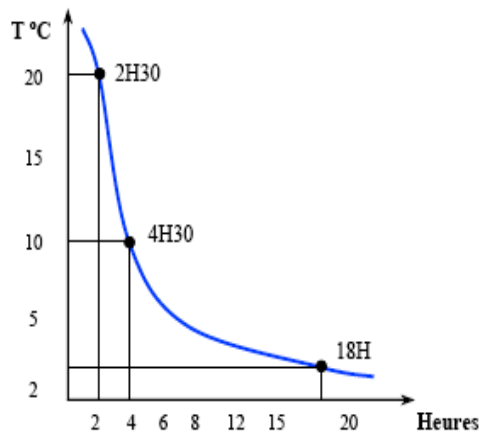
- el tipo de cemento elegido.
- la dosificación en cemento.
- el contenido en agua (débilmente).
- la temperatura inicial del hormigón (fuertemente).

Así, para un hormigón de 1 día, tendremos:

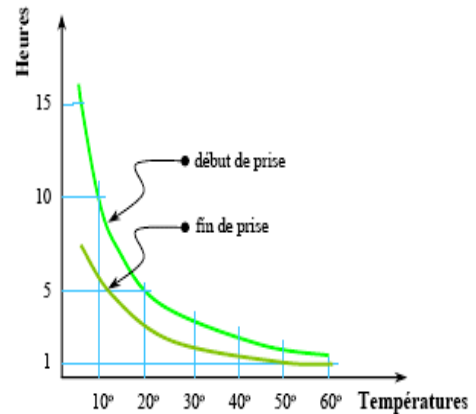
<u>T. inicial</u>	<u>Calor liberado</u>
5°C	20 cal/g
40°C	62 cal/g

Las siguientes características del hormigón fresco, son frecuentemente influenciadas por la temperatura:

- El inicio de fraguado empieza tanto más rápido, cuanto más elevada es su temperatura (ver figuras 2 y 3). Las mismas observaciones se pueden hacer para el endurecimiento.



**Figura 2. Evolución del tiempo de fraguado en función de la temperatura.**



**Figura 3. Influencia de la temperatura sobre el fraguado del cemento.**

- La docilidad del hormigón disminuye al aumentar la temperatura. Así, un ensayo de asentamiento con el cono de Abrams, éste pasa de 10 a 4cms si la temperatura pasa de 15 a 35°C.
- En relación con las primeras edades, se constata que un hormigón conservado a temperatura elevada presenta en sus primeros días una resistencia mecánica superior a la que tendría si hubiera estado conservado a más baja temperatura. Esta diferencia disminuye con el tiempo, hasta no ser significativa a los 28 días. Así, para un CPA 325:

Resistencia a la compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )			
T/días	1	3	28
20°C	100	220	450
40°C	200	280	425

Considerando la influencia del clima sobre el hormigón, el problema se complica. Por ejemplo:

- El aire ambiente en contacto con el hormigón intercambia calor sensible con éste e influye sobre su temperatura con las consecuencias vistas más arriba.
- La humedad del aire y la velocidad del viento, crean corriente de vapor de agua en la superficie del volumen de hormigón. Una temperatura ambiente elevada o la insolación, provocan un fuerte gradiente de concentración de vapor de agua en la superficie del hormigón, que acelera la evaporación del agua de amasado. Una evaporación muy intensa del agua tiene dos consecuencias nefastas:

- a) En principio, el endurecimiento que debe normalmente prolongarse sobre muchos meses, se para desde que falta el agua para la hidratación. Su resistencia mecánica no puede crecer más.
- b) Seguidamente, esta pérdida brutal de agua, acentúa los efectos de la retracción antes del fraguado cuando el agua no está ligada fuertemente, y los efectos de la retracción hidráulica después del fraguado. Estos efectos se manifiestan en esfuerzos de tracción que pueden provocar fisuras desde el momento que la resistencia a la tracción es sobrepasada.

A estas retracciones de origen hidráulico, se superpone una retracción de origen térmico. Efectivamente, desde el principio del fraguado en el hormigón fresco se origina un desprendimiento de calor importante, su temperatura sube al mismo tiempo provocando su dilatación (ver *figura 4*). Con el fraguado y seguidamente el endurecimiento, las propiedades del hormigón se modifican: el coeficiente de dilatación disminuye y su conductividad térmica es baja. Las partes internas de un volumen de hormigón se enfrían con menos rapidez que sus partes exteriores en contacto directo con el medio ambiente. De ello resulta un gradiente de temperatura en la masa de hormigón que engendra tensiones mecánicas. Este fenómeno será tanto más acusado cuanto más pronto ocurra, y aún el hormigón no haya tenido tiempo de desarrollar toda su resistencia mecánica, creando riesgos de fisuración.

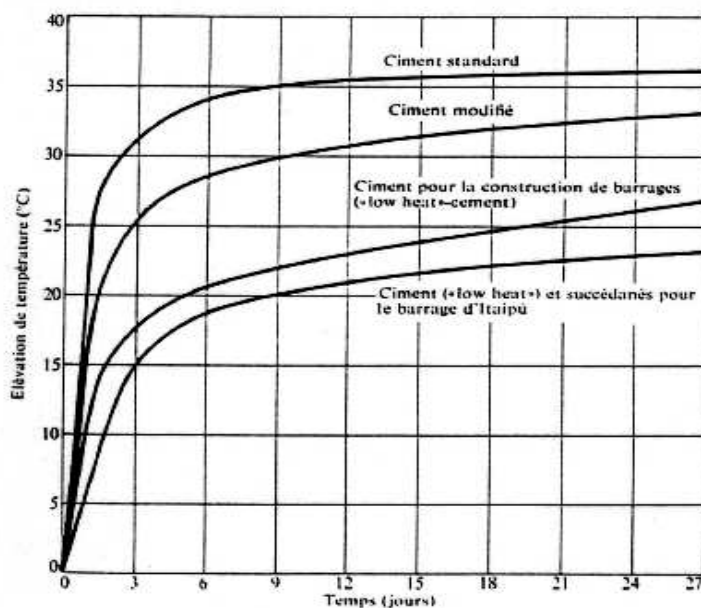
Diremos además, que las características mecánicas siguientes son alteradas por la temperatura:

- Su módulo de elasticidad disminuye. Por ejemplo, un hormigón con un módulo de elasticidad a 20°C de  $E = 3,6 \times 10^5$  bars disminuye a  $E = 2,7 \times 10^5$  bars a 80°C.
- Su resistencia a la compresión disminuye cuando la temperatura aumenta. Por ejemplo, el hormigón anterior que tiene una resistencia a 20°C  $R_c = 420$  bars ve su valor disminuir hasta  $R_c = 357$  bars a 80°C.

## 2. ¿CÓMO LUCHAR CONTRA LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA?

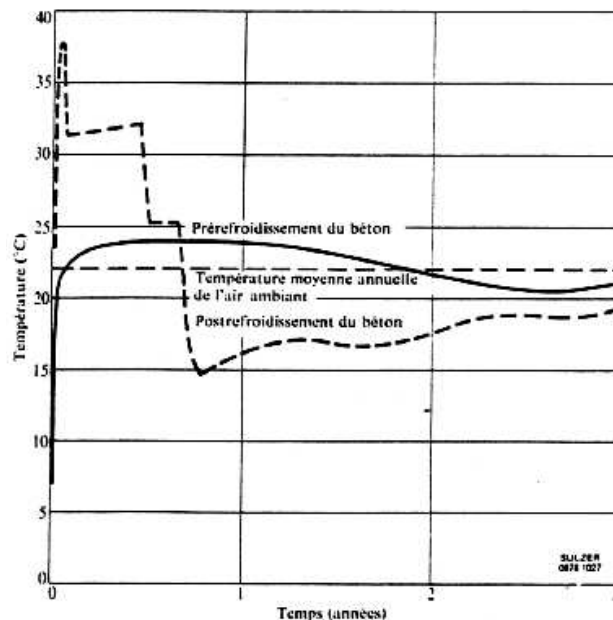
Para ello, disponemos de las siguientes armas:

- Elección de un cemento con bajo calor de hidratación, pero compatible con las resistencias mecánicas deseadas (ver *figura 4*).



**Figura 4. Elevación de temperatura en la masa de construcciones de hormigón, en función del tipo de cemento utilizado. (Presa de Itaipú)**

- Emplear una dosificación moderada de cemento, pero también estamos limitados a un mínimo compatible con las resistencias mecánicas requeridas.
- Granulometría bien estudiada.
- Áridos poco deformables y no porosos.
- Dosaje en agua lo más bajo posible, para obtener las resistencias mecánicas más elevadas, pero que permita una docilidad suficiente del hormigón. Este dosaje mínimo debe permitir también su hidratación completa.
- Aditivos: pueden ser productos plastificantes que eviten aumentar el agua de amasado, o bien productos retardantes del inicio de fraguado. Hay que controlar la compatibilidad del aditivo - cemento y asegurarse de que no tienen ninguna acción nefasta sobre las resistencias mecánicas.
- Enfriar el hormigón con agua helada mediante serpentines embebidos en su masa es un método utilizado en el pasado, pero, por imperativos de construcción cada vez es menos utilizado.
- Intentar disminuir el contenido en agua de los áridos para así aumentar la aportación de agua de amasado. Para ello, se protegerán los áridos contra la lluvia y la insolación y mediante una circulación de aire ambiente, se realizará de manera económica un secado de los áridos que además, acarreará una disminución de la temperatura de los mismos que tenderá hacia la temperatura de bulbo húmedo del lugar donde se realizará la obra.
- Proteger la superficie del hormigón desde su vertido y por lo menos, durante la semana que sigue. Para esto, se podrá recurrir a pulverizar agua en la superficie, mantener una capa de agua en permanencia, o bien proteger la superficie por una lámina de polietileno u otro recubrimiento plástico de color claro. No obstante, es preferible recurrir a la pulverización de un producto de curado en la superficie a proteger. La elección de este aditivo será en función de la zona que se protege y del tratamiento posterior que se dará al hormigón.
- Bajar la temperatura del hormigón fresco de manera que la temperatura máxima del hormigón sea próxima a la temperatura ambiente (ver figura 5).



**Figura 5. Evolución de principio de la temperatura en la masa de construcciones de hormigón situada en países cálidos. (Presa de Itaipú).**

La temperatura de vertido del hormigón fresco en regiones cálidas será bastante más baja que la temperatura ambiente media, de manera que la

temperatura del hormigón que aumenta durante el fraguado, va aproximándose a ésta.

Debido a que el preenfriamiento del hormigón es el método más eficaz para paliar los inconvenientes del hormigonado en tiempo cálido, vamos a detallar a continuación los sistemas más empleados en la actualidad para llevar a cabo esta operación.

### **3. ENFRIAMIENTOS DE LOS MATERIALES**

Éste es realizado actualmente mediante los siguientes métodos:

- Enfriamiento de los áridos mediante aire frío o agua helada.
- Enfriamiento del agua de amasado a temperaturas entre 1 y 4°C.
- Sustitución de una parte del agua de amasado por hielo en escamas.

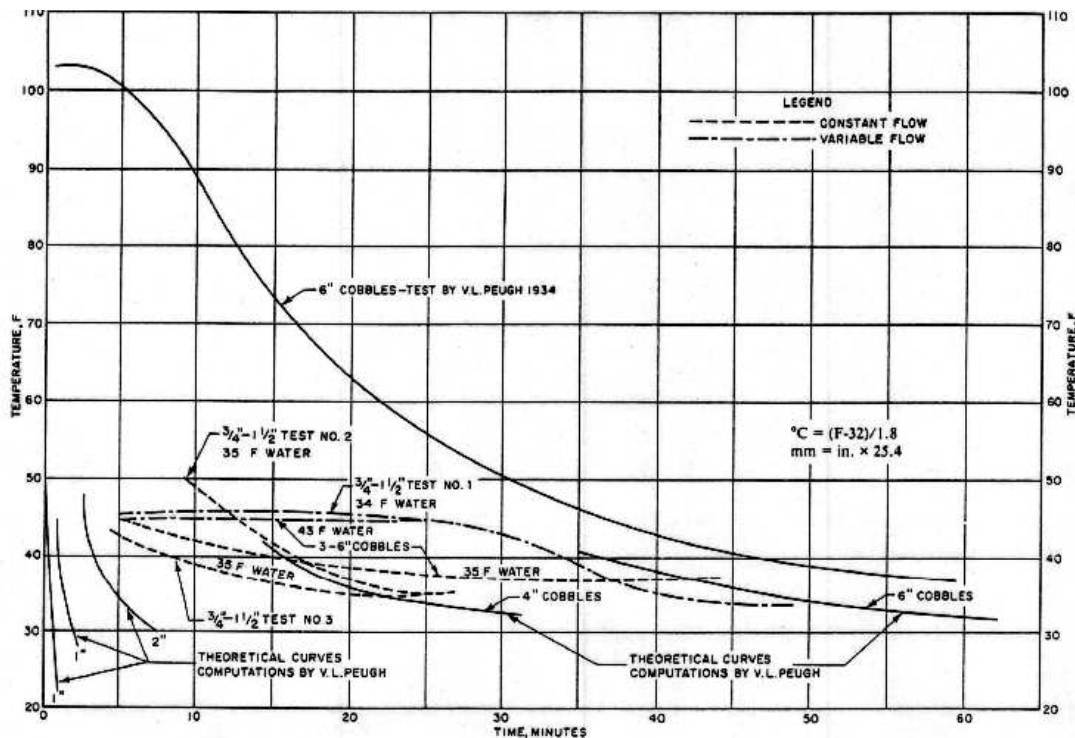
Estos tres métodos pueden ser combinados.

#### **3.1. ENFRIAMIENTO DE ÁRIDOS**

Su temperatura juega un papel importante sobre la temperatura del hormigón. Una variación de 10°C sobre los áridos, produce una variación de 6°C sobre la temperatura del hormigón fresco.

##### **3.1.1. ENFRIAMIENTO DE ÁRIDOS CON AGUA HELADA**

El método más rápido de enfriar los áridos es sumergiéndolos mediante un transportador de cinta en un tanque alimentado con agua helada. Dependiendo del tamaño del árido se puede alcanzar una temperatura de 5°C en un tiempo de 1 a 8 minutos para tallas de hasta 80mm. Para tamaños mayores hasta 150mm se debe considerar un tiempo de 35 minutos (ver figura 6).



Note: All tests were made by R. McShea except those indicated as made by V. L. Peugh.

**Figura 6. Teoría matemática del enfriamiento de áridos por inmersión en agua helada (ASHRAE 1978 Applications Handbook).**

Éste enfriamiento ocurre mucho más rápido que en una corriente de aire. Sin embargo, es necesario disponer a la salida de un transportador a cinta inundado, de un sistema eficaz de eliminación de agua mediante un tapiz vibrante u otro medio parecido, además de un tanque de recuperación de agua para reinyectarla en el circuito.

Este método ocasiona por una parte, una pérdida de agua helada y por tanto, de potencia frigorífica y por la otra, la dificultad de controlar con exactitud el porcentaje de agua en los áridos enfriados y como consecuencia, la cantidad del agua de amasado, originando una calidad variable de hormigón.

### **3.1.2. ENFRIAMIENTO DE ÁRIDOS POR AIRE FRÍO**

Para enfriar los áridos con aire, es necesario inyectar grandes caudales de aire frío a través de los áridos al interior de los silos. Los silos deben de estar equipados de un sistema de distribución de aire interior de manera que garantice una repartición uniforme de éste, para conseguir una temperatura homogénea en los áridos.

Normalmente, las baterías enfriadoras de aire con ventiladores centrífugos están instaladas en las tolvas de los silos formando un circuito cerrado para la recirculación del aire que se realiza por la parte superior de los silos. Las pérdidas de carga en el circuito de aire son importantes, se puede trabajar a temperaturas inferiores a 0°C, y los diversos compartimentos de áridos tienen que estar aislados térmicamente.

El resto del equipo frigorífico, formado por compresores, condensador evaporativo, separadores y elementos de control, está alojado en el interior de un contenedor.

Este método permite un control más preciso del contenido en agua de los áridos y, por tanto, de la calidad del hormigón. Sin embargo, este método es oneroso y caro de instalar y el circuito de frío está sometido a condiciones de funcionamiento muy inestables a causa de las variaciones climáticas y las variaciones del nivel de áridos en los silos.

### **3.2. ENFRIAMIENTO DEL AGUA DE AMASADO**

Esta operación es económica y fácil de realizar, pero de una eficacia limitada ya que una variación de 10°C sobre la temperatura del agua solo crea una variación de 2°C sobre la temperatura del hormigón fresco.

El equipamiento frigorífico para enfriamiento del agua se instala en el interior de un contenedor de 6mts y su capacidad frigorífica se dimensiona para enfriar el caudal de agua de amasado partiendo de una temperatura de entrada de agua de +45°C a + 30°C, según las condiciones climáticas del país donde se realizará la obra hasta una temperatura final de +5°C a + 1°C, según especificaciones.

El equipo frigorífico de enfriamiento de agua requiere ir montado sobre un tanque de almacenamiento de agua aislado térmicamente. De acuerdo con la talla de la obra, el tanque de almacenamiento puede ser realizado:

- Con un contenedor metálico standard de 12mts, aislado para una capacidad máxima de 50m<sup>3</sup>.
- Con un tanque metálico aislado y montado sobre una estructura metálica autoportante con capacidad hasta 150m<sup>3</sup>.
- También se puede realizar in situ en la obra, con hormigón aislado térmicamente y para cualquier capacidad.

**INESA** realiza el enfriamiento de agua de 45°C/30°C hasta 5°C/1°C en varias etapas con objeto de conseguir un alto rendimiento energético en esta operación. En las primeras etapas, empleamos intercambiadores de placas en acero inoxidable con su correspondiente compresor y bomba de circulación de agua. La última etapa la

realizamos con un intercambiador especial tipo Baudelot de película descendente que permite enfriar el agua hasta 1°C, evitando los problemas de congelación al interior de los tubos que provocarían los enfriadores clásicos. Con este sistema de enfriamiento por etapas, conseguimos un ahorro de potencia entre 25% y 50% inferior a la potencia empleada por un enfriador de agua convencional.

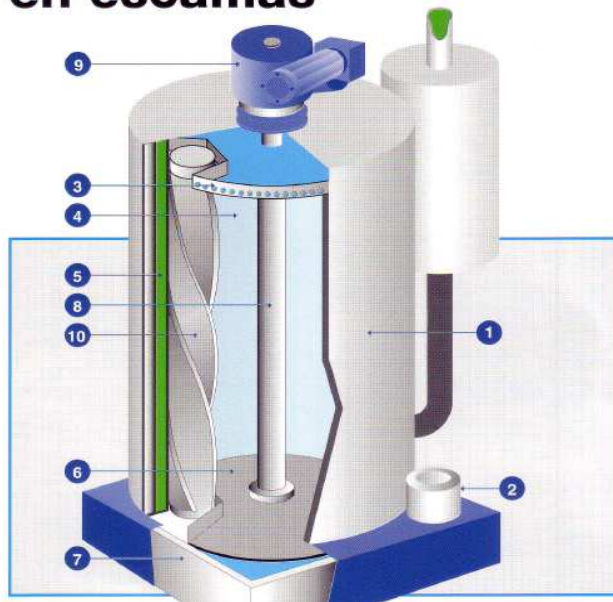
### **3.3 SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGUA DE AMASADO POR HIELO**

Éste es el método más eficaz que puede evitar en muchos casos el enfriamiento de áridos. En efecto, la sustitución de 5 litros de agua por 5Kg de hielo, genera una disminución de 1°C en la temperatura del hormigón fresco. En general, los organismos de control limitan la aportación de hielo al 80% del agua de amasado. No obstante, lo importante es que todo el hielo esté fundido al final de la operación de amasado, que dura alrededor de dos minutos.

Para conseguir una fusión rápida del hielo, cualquier tipo de hielo troceado se debe proscribir. El hielo que se emplea es el formado por escamas que presenta una gran relación superficie/volumen ya que estas escamas tienen una superficie de 7 a 12cm<sup>2</sup> y un espesor de 1 a 1,5mm.

Las escamas son fabricadas de manera clásica en máquinas muy empleadas en industrias agroalimentarias (ver *figura 7*) y cuyas capacidades unitarias van de 3Tn a 60Tn por día. Este hielo almacenado en un silo permitirá una dosificación masiva de escamas, en el breve periodo de tiempo disponible para cargar la amasadora. Debido a las dimensiones de las escamas, éstas se repartirán muy bien fundiendo rápidamente y bajando la temperatura de manera uniforme en toda la masa del hormigón.

## **Generadores de hielo en escamas**



#### **Descripción del funcionamiento**

El generador tiene una doble pared aislada exteriormente (1). El intercambiador de calor se hace en interior del cilindro, dentro del agua que corre de manera continua en la pared interna (4) y del refrigerante que se evapora a baja temperatura en la doble pared (5). El agua de la base (7) llega por medio de una bomba (2) a una cubeta de distribución (3). Riega, a través de los orificios de esta cubeta, la superficie de congelación con excepción de la zona donde la fresa con dientes helicoidales (10) esta situada. El agua se congela en esta superficie enfriada. El exceso de agua no congelada es reenviado por un deflector (6) a la cubeta de recuperación (7) y recirculado por bomba. El eje central (8) accionado por un reductor motorizado (9) soporta una fresa de dientes helicoidales que despega el hielo de la pared sin tocarla. El hielo cae en la parte de almacenamiento por una apertura debajo de la maquina.

***Figura 7. Principio de funcionamiento de generador de hielo en escamas.***

El modo de almacenamiento del hielo dependerá de la talla de la obra. En general, se emplean silos verticales de cadena u horizontales de rastillo en recintos aislados y mantenidos por un equipo frigorífico autónomo a -5°C/-7°C mediante circulación de aire frío.

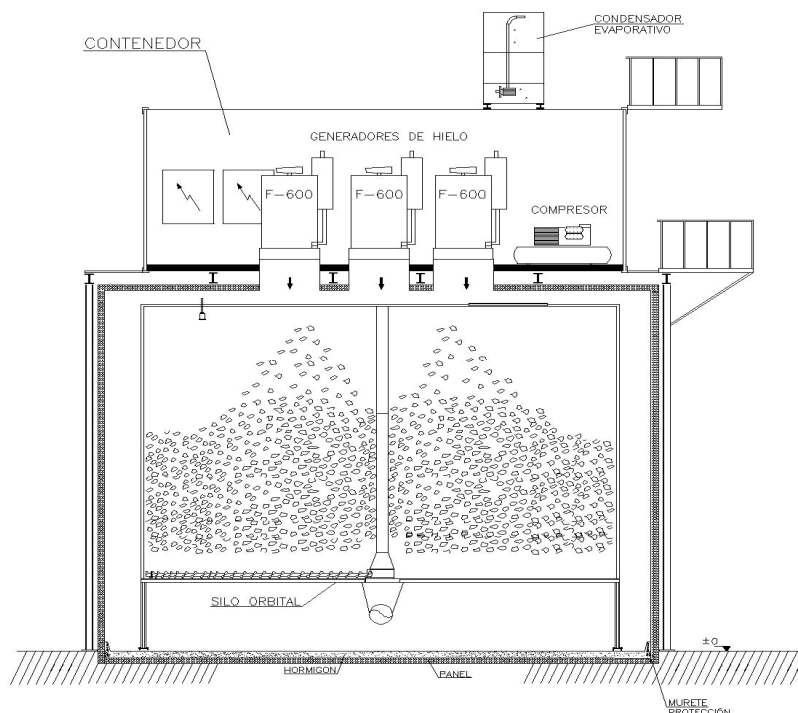


Nuestra empresa fabrica un silo tipo orbital (ver figuras 8 y 9) que tiene la ventaja de ser completamente FIFO (*First In, First Out*) y de un manejo fiable y sencillo.



**Figura 8. Disposición general silo orbital de almacenamiento de hielo.**

El hielo en escamas es extraído de los silos mediante un tornillo sinfín y transportado hasta el silo de día (*day tank*) situado en el sistema de pesaje de la central de amasado mediante un transportador de sinfín o bien un transportador neumático dependiendo de la distancia entre la fábrica de hielo y la central.



**Figura 9. Esquema de principio de planta de fabricación de hielo.**

#### **4. RENTABILIDAD DEL ENFRIAMIENTO DEL HORMIGÓN**

Además de las ventajas técnicas resultando de la utilización del hormigón fresco a baja temperatura expuestas en los capítulos anteriores y aunque los costes del enfriamiento del hormigón parezcan muy elevados a primera vista, ellos no representan generalmente para la construcción de una presa de cierta importancia más que un pequeño porcentaje de la inversión total en otros equipamientos necesarios; tales como máquinas excavadoras, instalación de preparación de áridos, centrales de amasado, transportadoras por cables, grúas, camiones todo terreno, talleres de mantenimiento, etc. Junto a las ventajas técnicas, el enfriamiento del hormigón representa también un interés económico. El hecho de reducir los intervalos entre vertidos, combinado con la posibilidad de prever espesores de tongadas más importante, permite en la mayoría de los casos, una reducción del tiempo de construcción que puede llegar hasta la mitad de tiempo normalmente necesario.

Conforme a datos experimentales, se puede subrayar que los costes debidos a la construcción y a la explotación de grandes instalaciones para el enfriamiento del hormigón, no representan más que una fracción de la economía resultante de la disminución del tiempo de construcción (inmovilización del capital).

#### **5. CONCLUSIÓN**

La mayoría de las cuencas hidrográficas de nuestro país, están situadas en zonas cálidas donde la colocación en masa de hormigón en tiempo caluroso se debería realizar a temperaturas próximas a los 15°C.

En los países del Golfo Pérsico, por sus extremas condiciones climáticas casi la totalidad de la obra civil que se realiza emplea actualmente la combinación de enfriamientos de áridos, agua de amasado a 1°C y la máxima aportación de hielo en escamas que permite el amasado del hormigón. Sin embargo, nuestra climatología permite alcanzar temperaturas de vertido del hormigón correctas aprovechando el frío generado por la aportación de agua helada y hielo en escamas y evitando recurrir al enfriamiento de áridos que, como se ha visto anteriormente, es una operación engorrosa, cara y con un coste energético considerable.

Finalmente, queremos hacer hincapié en que la adquisición de una central de agua helada y otra de producción de hielo con su ubicación en el interior de contenedores standard, permite a las constructoras seguir empleando este material en otras obras por un periodo de muchos años si realizan un mantenimiento correcto de este material.