

T-403
G
DES

320

01149
0556

45

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DEL DOCTORADO

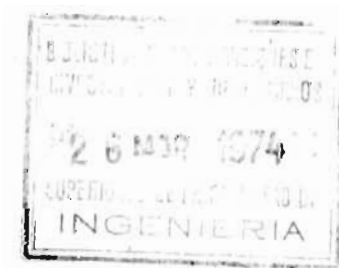
TECNICAS DE ACELERACION
DEL ENDURECIDO DEL CONCRETO

TESIS QUE PRESENTA EL
ING. ISAIAS /GARCIA TERRAZAS
EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA

MEXICO D. F.

JUNIO DE 1967

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A MI ESPOSA.

P R O L O G O

Este trabajo es un estudio en el campo del comportamiento del concreto como un material de construcción.

El uso del concreto en la tecnología moderna comprende todos los campos de la construcción; Pavimentos, torres, conjuntos urbanos, diques, canales, etc. Sin embargo las posibilidades que encierra este material aún no están completamente aprovechadas en la práctica.

La elección de éste tema es un esfuerzo para adentrarse en el comportamiento del concreto y particularmente en lo que se refiere al tiempo que le toma a la mezcla fluida de pétreos-agua y cemento, llegar a constituir un material sólido capaz de desarrollar su resistencia mecánica final.

El presente escrito es un anticipo de la gran investigación contemporánea todavía inconclusa, en la que participan numerosos investigadores. Las ideas que aquí se expresan por lo mismo están sujetas a posteriores revisiones que rectificarán o ratificarán su validez. Sólo se ha pretendido compendiar las conclusiones obtenidas durante los últimos años, en la medida que tuvimos posibilidad y capacidad para ello.

Antes de adentrarme en la parte académica quiero expresar mi reconocimiento y gratitud al Instituto Nacional de la Investigación Científica, quién patrocinó mis estudios de post-graduado correspondientes a esta etapa. A la División del Doctorado del Instituto de Ingeniería de la Universidad

Nacional Autónoma de México, a sus profesores y alumnos, y a todas las personas que hicieron posible la terminación de este curso.

Ing. Isaiás García Terrazas

I N D I C E

PROLOGO	-----	1
INDICE	-----	iii
INTRODUCCION	-----	v
CAPITULO I	ANTECEDENTES GENERALES -----	1
	COMPOSICION DEL CONCRETO -----	1
	ALUMINATOS -----	2
	SILICATOS -----	2
	TIPOS DE CEMENTO PORTLAND -----	3
	ADITIVOS -----	4
	CURADO -----	5
	PROCESO DE HIDRATACION Y ENDURECIMIENTO-	5
	ENDURECIMIENTO DEL CONCRETO -----	6
	ESTABILIDAD TERMODINAMICA -----	7
	ARREGLO INTERCRISTALINO -----	7
	ESPACIO INTERATOMICO -----	7
	PERIODO DE FORMACION DEL CONCRETO -----	8
CAPITULO II	AGENTES QUIMICOS -----	9
CAPITULO III	CALOR DE FORMACION -----	19
	TRATAMIENTO CON VAPOR DE AGUA -----	20
	PRESION Y VAPOR DE AGUA -----	25
	VAPOR DE AGUA Y CaCl_2 -----	26
	CALOR DE FORMACION UTILIZANDO ELECTRICIDAD	27

CALOR CON RAYOS INFRARAJOS -----	37
OTRAS TECNICAS DE CALENTAMIENTO -----	39
CAPITULO IV VIBRACION -----	41
CAPITULO V FINURA DE MOLIDO -----	43
CONCLUSION -----	48
BIBLIOGRAFIA -----	49

TECNICAS DE ACELERACION DEL ENDURECIDO DEL CONCRETO

- INTRODUCCION -

En la tecnología moderna viene utilizandose cada vez más el concreto como material de construcción. El éxito de éste compuesto de materiales cementantes y pétreos recide principalmente en la economía que puede lograr, en su propiedad de moldeabilidad antes de endurecer y su resistencia mecánica después de endurecido, que le permiten incorporarse a las más variadas sollicitaciones estructurales y trabajar en conjunto con otros materiales de la construcción moderna.

En la industria de la construcción actual y más particularmente en la industria de la pre-fabricación de elementos de concreto simple, reforzado y preesforzado, el tiempo que transcurre entre la elaboración de la mezcla y el momento en que ésta ha alcanzado su resistencia de trabajo, es un factor muy importante tanto en la economía, como en la organización de la producción.

Este escrito se aboca a la compresión y modificación de éste parámetro "tiempo", en la elaboración de elementos de concreto. Es una recopilación de las publicaciones que sobre éste particular han estado a nuestro alcance y que pueden lograr de una forma rápida y eficiente acelerar el endurecido del concreto.

El estudio se limita a concretos fabricados con cemen-

tos "Portland". Es posible obtener concretos con resistencias altas a edades tempranas utilizando cementos especiales. Estos no serán tratados aquí.

Comúnmente para lograr una resistencia determinada en el concreto se utiliza de dos a tres veces más cemento del necesario. Esto se debe a que no han sido utilizados todas las posibilidades del cemento para la formación de la estructura del concreto.

En este trabajo se pretende señalar la forma de aprovechar al máximo dichas posibilidades del cemento, indicando los procedimientos que se utilizan actualmente para la elaboración del concreto basados en las tecnologías siguientes:

ADITIVOS QUIMICOS; Este es un método frecuentemente utilizado y consiste en activar químicamente la formación de la estructura del concreto.

TEMPERATURA; Se obtiene una influencia positiva en la formación de la estructura del concreto al aumentar la movilidad de los átomos que formarán dicha estructura, puesto que es la movilidad la que gobierna el número de uniones formadas por unidad de tiempo (proceso de difusión).

VIBRACION MECANICA; Esta retrasa el estado de formación inicial de la estructura y origina un aumento de las uniones intercrystalinas, lo que aumenta la resistencia final del concreto.

FINURA DE MOLIDO; Puesto que la reacción entre la fase

sólida y la líquida depende de la superficie específica del sólido, un cemento de mayor superficie específica (de mayor finura) tendrá mayor reactividad. (8)

ANTECEDENTES GENERALES

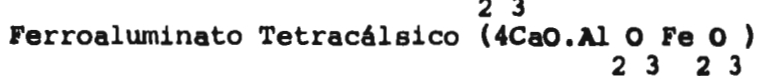
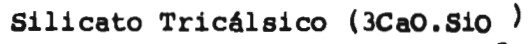
El concreto tal y como la conocemos ahora es una mezcla de agregados pétreos, cemento y agua que permite ser colocada en moldes para formar piezas estructurales, donde al endurecer, podrá tener cierta resistencia.

El cemento "Portland", aglutinante de la mezcla del concreto, pertenece al grupo de los aglutinantes hidráulicos, tiene la propiedad de endurecer no solamente al aire libre como las cales sino también debajo del agua.

El cemento "Portland" según las especificaciones de la ASTM es el producto obtenido por la molienda de un "clinker" producido por la calcinación, hasta la fusión incipiente de una mezcla íntima, rigurosa y homogénea de materiales arcillosos y calcáreos sin adición posterior a la calcinación excepto yeso y otros materiales que no exedan del 1% y no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento.

COMPOSICION DEL CEMENTO;

Son cuatro los principales componentes del cemento;



Estas fórmulas químicas se expresan por comodidad respectivamente: C₃S, C₂S, C₃A, y C₄AF.

Además entran en su composición un 3 % de sulfato de cal

cio (yeso), óxido de magnesio (MgO), y los alcalis del cemento que son la cal libre (CaO), y óxidos de sodio y de potasio.

Las propiedades de cada uno de los componentes principales del cemento pueden resumirse de ésta manera:

ALUMINATOS;

Estos se hidratan muy fácilmente y necesitan del yeso para retardar el fraguado inicial del concreto.

El fraguado inicial se debe a los aluminatos, cuya acción alcanza su máxima eficacia a las 24 horas. El C A, desarrolla gran cantidad de calor al hidratarse. El C AF tiene menor cantidad de alúmina, que es sustituida por el óxido de fierro y que se traduce en una menor generación de calor de hidratación.

SILICATOS

La hidratación del C S es más lenta pues se forma el hidrato cálcico gelatinoso y la sílice gelatinosa, que dan protección a las partículas del cemento aún no hidratadas, de tal manera que la acción del C S está comprendida entre las 24 horas y los 7 días y contribuye al endurecimiento normal de la pasta del cemento.

El C S, mucho menos hidráulico reacciona muy lentamente entre los 7 y los 28 días y ejerce su acción hasta en periodos mayores del año.

Junto con los otros componentes proporciona en forma definitiva las altas resistencias últimas del concreto.

TIPOS DE CEMENTO "PORTLAND"

Tipo Uno; CEMENTO NORMAL;

Su fraguado inicial se presenta a los 45 minutos desde el momento que se mezcla con el agua y su periodo de endurecimiento es de 28 días.

Contiene 43% de C₂S, 31 % de C₃S, y 12% de C₃A.

Tipo Dos;

Se caracteriza por el bajo contenido de C₃A y contenido alto de C₄A F.

Su fraguado es lento y su endurecimiento retardado. Tiene los mismos porcentajes de silicatos que el cemento normal.

Tipo Tres;

Proporciona altas resistencias a corta edad tiene mayor contenido de C₃S además de ser de granos más finos.

Tipo Cuatro;

Tiene altos porcentajes de C₂S y C₄A F su calor de hidratación es bajo.

Tipo Cinco;

La suma de C₃S y C₂S es excepcionalmente alta y la de C₃A y C₄A F muy baja.

DOSIFICACIONES

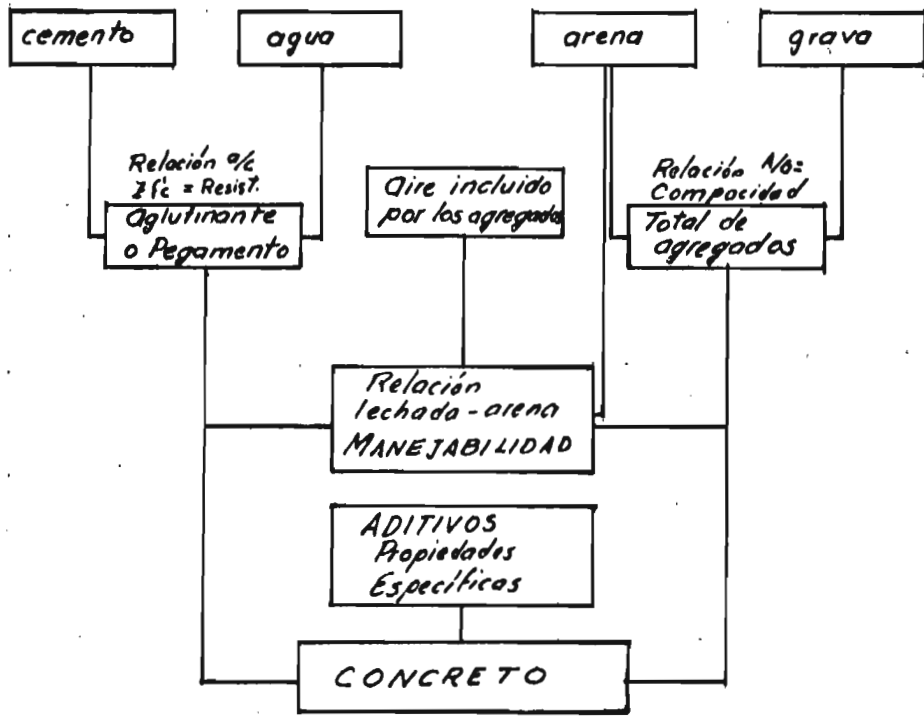
Una vez determinados los agregados pétreos es necesario determinar la relación agua-cemento que corresponda a la resistencia del concreto prefijada.

Esto puede llevarse a efecto por medio de la relación

de "Abrahams" $f'c = \frac{A}{Bx}$ en la que x es la relación de agua cemento. Por tanto a igualdad de parámetros A y B, menor relación agua cemento hay mayor resistencia (A depende del sistema de unidades y B de la eficiencia del cemento)

ADITIVOS

Un aditivo es una sustancia química distinta a los agregados del cemento y del agua que interviene directamente en la manufactura del concreto, y sirve para modificar sus propiedades.



CURADO

Una vez que el concreto ha sido dosificado, mezclado y vaciado, se debe dejar protegido por una delgada capa de agua que cubra las superficies expuestas al aire y al sol, o bien con productos de películas temporalmente impermeables que evitan la pérdida de humedad por evaporación.

"PROCESO DE HIDRATAACION Y ENDURECIMIENTO"

Al llegar a ésta etapa en la fabricación del concreto, el concreto aún no está listo para soportar los esfuerzos para los cuales se ha proyectado. Tiene que llevarse a cabo un proceso durante el cual la mezcla se va endureciendo. Si se examina en el microscopio diversas muestras de pasta de cemento, y agua durante el proceso de hidratación se notarán primero granos finos de cemento relativamente grandes y cristales de hidrato de cal embebidos en una masa homogénea de aspecto viscoso.

Después de una hora aparecen unos grumos gelatinosos aparentemente amorfos, cuyos elementos constitutivos no pueden ser identificados ni aún con los más potentes microscopios. A estos grumos de consistencia homogénea se les llama "geles".

Los geles aparecen sobre la superficie de los granos de cemento y en el agua que llena los espacios capilares entre ellos. Conforme va progresando el proceso de hidratación aumenta en tamaño y en número, y al cabo de 28 días han ocupado todo el espacio capilar, constituyendo una liga sólida -

entre los granos grandes de silicato de calcio cristalizado que quedan unidos entre sí.

Una vez que ha sido vaciada la mezcla en los moldes ésta va adquiriendo lentamente consistencia sólida. Se define como tiempo de fraguado el que transcurre hasta el momento en que el concreto pierde trabajabilidad .

Aunque no hay ninguna diferencia fundamental entre fraguado y endurecimiento, el fraguado "rápido" no es sinónimo de "resistencia rápida". El primero es inmediato al tiempo del vaciado, por ejemplo; por carecer de yeso suficiente, mientras que la segunda se adquiere después de unos días de endurecimiento y nada tiene que ver con el tiempo de fraguado.

ENDURECIMIENTO DEL CONCRETO

Hay que diferenciar debidamente lo que son las resistencias máximas que se alcanza y lo que es la prontitud o rapidez conforme a las que se van presentando. La máxima resistencia del cemento endurecido depende enteramente de la cantidad de agua de la mezcla, mientras que la prontitud de endurecido depende de la composición química del cemento, de las condiciones de humedad y temperatura, de los agentes químicos que se adisionan, y de los procesos mecánicos a que se someta la mezcla durante el tiempo de fraguado.

Para acelerar la adquisición de resistencia en la actualidad se cuenta con diversos métodos que logran con eficiencia el propósito.

Dichos procedimientos están basados en acciones directas o indirectas que afectan a los parámetros determinantes de la formación de la estructura misma del concreto. Entre dichos parámetros podemos anotar los siguientes:

A) La estabilidad termodinámica del compuesto

B) El arreglo cristalino y

C) El espacio interatómico.

A) Estabilidad Termodinámica:

El período de formación de la estructura es termodinámicamente inestable, es un estado de transición que presenta gran complejidad y en el que se libera energía mientras se forma la estructura. Debido a esta liberación de energía excedente en forma de calor el proceso es exotérmico. La energía es producida por los átomos interactuantes en el volumen en formación. Es necesario tener una cantidad de átomos por unidad de volumen estrictamente definida para tener estructuras termodinámicamente estables, que son las que nos interesan.

B) Arreglo Inter cristalino:

Los átomos están arreglados en el espacio cristalino por medio de uniones que guardan entre sí relaciones de equilibrio y de los cuales depende la resistencia mecánica de la estructura formada.

C) El Espacio Inter-Atómico:

Directamente de éste dependen las fuerzas de atracción y repulsión entre los átomos y por tanto éste parámetro es determinante en la resistencia de la estructura formada.

Los procedimientos propuestos para lograr aceleración en la adquisición de resistencia, son diversas manera de obtener una mayor estabilidad, y una mejor estructura cristalina en los distintos periodos de formación del concreto.

Pueden distinguirse tres periodos de formación del concreto:

A) Periodo de Inducción:

En el cual los productos de la hidratación originados aún no tienen ligaduras. Este periodo va desde el mezclado hasta la iniciación del fraguado.

B) Periodo de Coagulación:

Que empieza al originarse las uniones y en el cual el concreto adquiere resistencia mecánica y consistencia pétrea. Termina al tiempo del fraguado total.

C) Periodo de estabilización:

Que está caracterizado por el aumento de resistencia de los compuestos formados durante el fraguado. Termina al alcanzar su resistencia final.

Para concretar la atención sobre el aspecto físico-mecánico del proceso de endurecimiento, dejamos a un lado el periodo de inducción, para estudiar únicamente los periodos de coagulación y de estabilización del cemento.

AGENTES QUIMICOS

Entre los procedimientos utilizados para lograr concretos más resistentes y rápidos son conocidos los que toman en cuenta la naturaleza química de la formación del concreto al hidratarse el clinker, y aprovechan ésta condición para modificar la velocidad de formación de la estructura. De ésta manera se pueden obtener diferentes resultados deseables en los concretos elaborados.

La reacción química entre el clinker y el agua se controla por medio de adiciones de diferentes compuestos químicos que comúnmente se conocen como agentes químicos o aditivos.

Cuando se elabora un concreto conviene introducir dichos "agentes químicos acelerantes" éstos aumentarán notablemente la resistencia inicial del concreto en elaboración propiciando una formación temprana de la estructura. (18)

A continuación enunciamos las teorías químicas que explican los cambios inducidos por los agentes químicos en la composición y velocidad de la formación de la estructura cristalina del concreto;

10.- Al agregar a la reacción de hidratación del clinker mezclas químicamente activas, como electrolitos, se incrementa la solubilidad de los minerales del clinker aumentando la velocidad de adquisición de resistencia del concreto. Esta velocidad de endurecimiento es directamente proporcional al grado de ionización ácido o básico de la mezcla del concreto.

2o.- Otra manera de acelerar la formación de la estructura del concreto consiste en utilizar catalizadores durante la reacción química que origina el concreto .

La acción catalítica tiene la ventaja de permitirnos tener más en cuenta los procesos electrolíticos de la hidratación del clinker, y nos da idea de problemas prácticos tales como la elección del tipo y proporcionamiento de los endurecedores más efectivos, de su tiempo de fraguado y de la velocidad de endurecimiento del concreto. (14)

3o.- Se pueden también incluir otros elementos que integrados a la estructura en formación modifiquen sus propiedades mecánicas de resistencia de manera conveniente.

4o.- El proporcionar centros activos de cristalización es otra forma de acelerar la formación de la estructura cristalina del concreto.

Como mezclas activas pueden emplearse muchas substancias, las cuales reaccionan con el hidrocilicato cálcio (Ca(OH)_2) en presencia de catalizadores, tales son los compuestos silícicos siguientes; gaize, tuff, arena, roca quemada, caolín y otros hidratos de aluminio. También cloruros, solubles, carbonatos, fluocilicatos, hidroxilos y algunos compuestos orgánicos tales como la triethanolamine.

Estos compuestos se surten en forma de polvos o líquidos para ser mezclados con el cemento. De esta manera se obtienen en casos deseados tiempos de fraguados tan cortos como 30 segundos.

Existen mezclas de cemento acelerador y arena que tienen un fraguado inicial de 4 minutos y final de 10 minutos y son empleados para cerrar grietas estructuras o reparaciones de emergencia. Debemos decir que la resistencia última de tales morteros es mucho menor a la de cementos sin acelerantes.

El efecto acelerante de los aditivos está íntimamente ligado con la densidad del concreto. Prácticamente los pesos volumétricos del cemento con los aditivos más activos como los cloruros y nitratos de calcio y de potasio, no difieren considerablemente del cemento sin aditivos. Algunos cloruros solubles especialmente el cloruro de calcio (CaCl_2) tiene aplicabilidad general como acelerantes.

El cloruro de calcio es el más usado de los acelerantes químicos, reacciona con el (C A) y con las fases sílicas. Se encuentra disponible en dos formas; granulado y mineral. Puede utilizarse con seguridad abajo de 2% del peso del cemento, mayores cantidades solamente accidentalmente resultan ventajosas pero en general tienen efectos nocivos. Sobrepasando el 3% se corre el riesgo de tener un fraguado instantáneo.

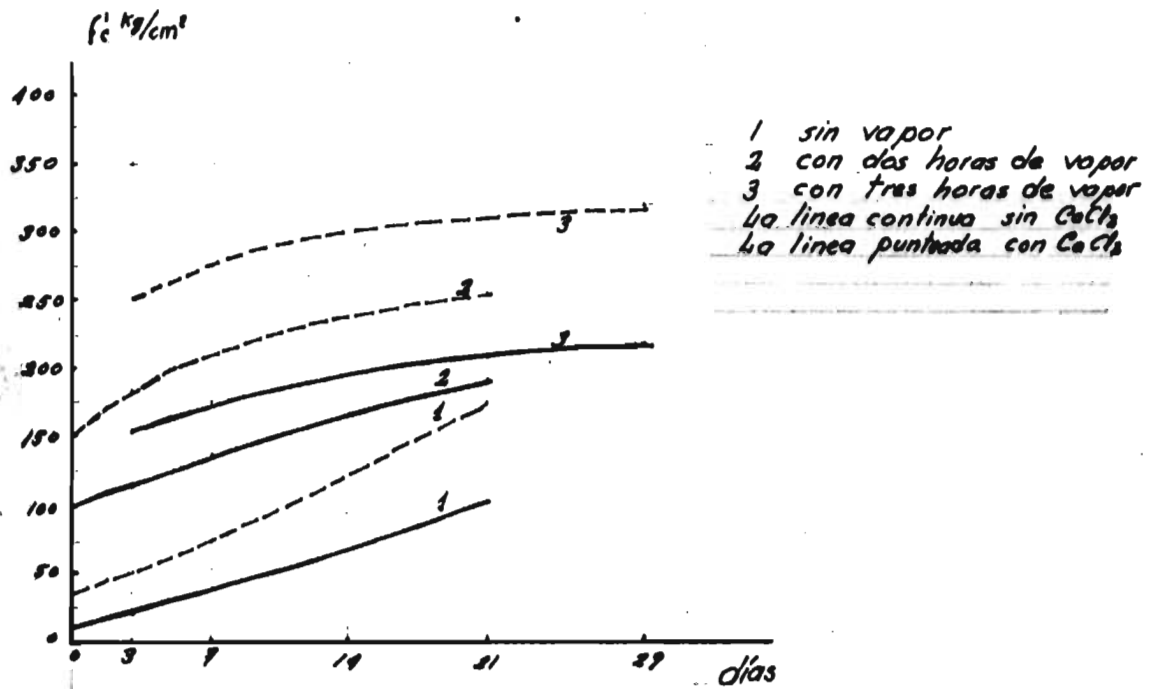
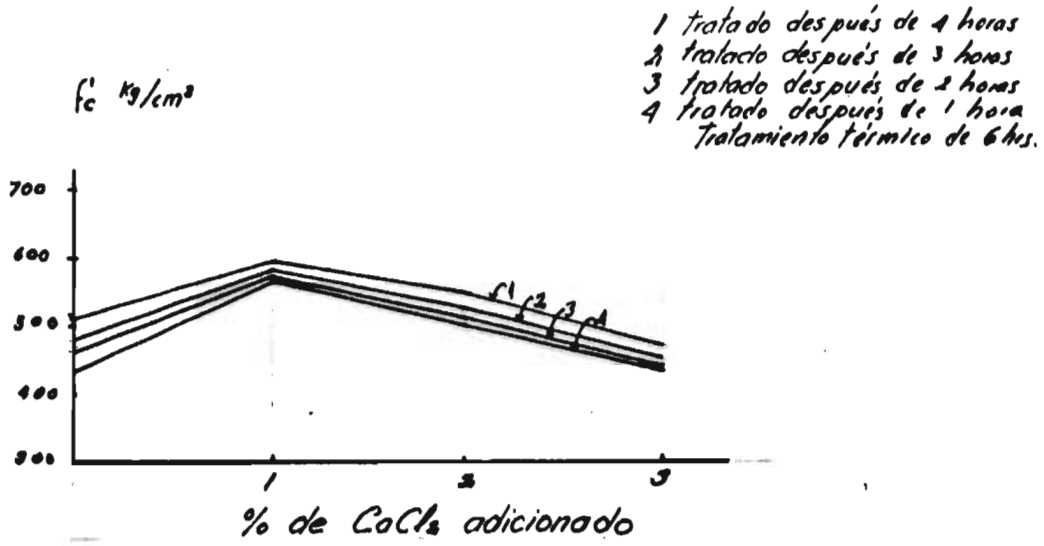
Con el cloruro de calcio se reduce el tiempo de fraguado inicial del cemento "Portland" ordinario a una tercera parte, y el tiempo de fraguado final en la misma proporción. La velocidad de adquisición de resistencia es máxima a las 72 horas después de mezclado, luego disminuye. En la mayoría de los casos la cantidad de 1% en peso de cemento de cloruro

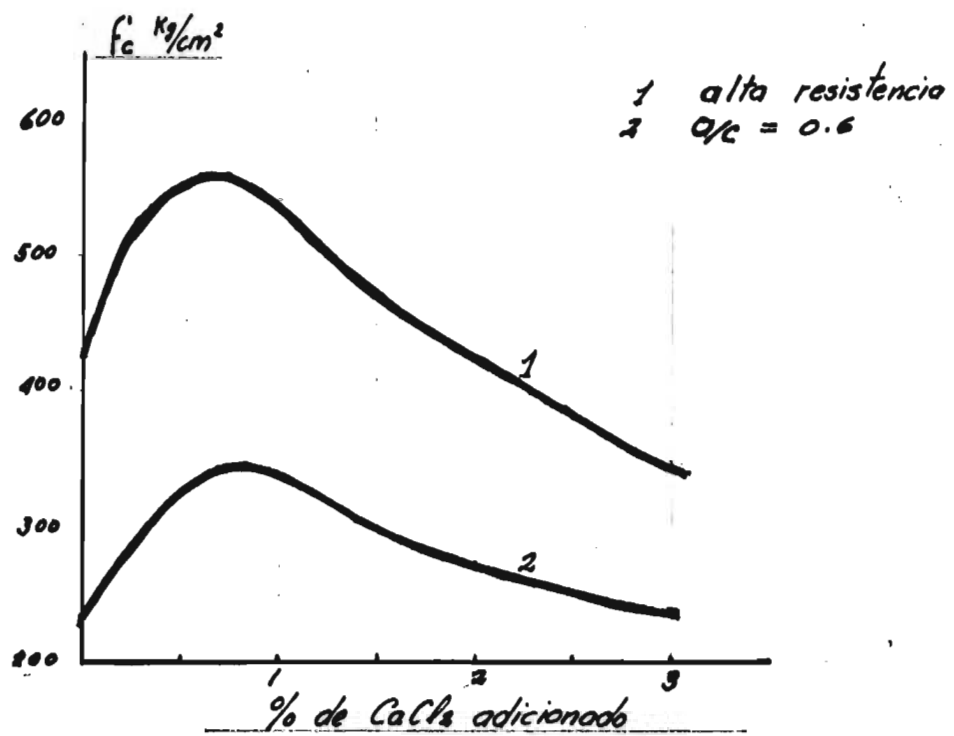
de calcio es suficiente para acelerar el fraguado y el endurecimiento del concreto aún en climas fríos. Sin embargo la cantidad óptima que puede agregarse depende del tipo de cemento, la temperatura del concreto y la temperatura ambiente. (40) Dicha cantidad óptima se determina en pruebas de laboratorio y normalmente es el 2%.

El $(CaCl_2)$ actúa como un retardador si la concentración es muy baja (37), por lo tanto es muy importante que esté uniformemente distribuido en toda la mezcla. Esto se logra disolviéndolo y agregándolo con el agua de mezclado (39).

Como complemento al método de curado con vapor la utilización del aditivo en cuestión permite obtener una resistencia del 70 al 80% de la resistencia normal que alcanzaría a los 28 días, inmediatamente al finalizar el tratamiento, y se logra además una reducción del tiempo de curado a vapor. Conviene señalar que el curado con vapor tiene algunos inconvenientes secundarios que lo ponen en desventaja respecto al tratamiento químico con cloruro de calcio, aunque como dijimos combinados suman sus posibilidades.

El proceso tecnológico de curado con vapor utilizando $(CaCl_2)$ como aditivo en la mezcla ^{varia} en diversos casos, pero con un contenido ² óptimo de aditivo es posible reducir a la mitad la duración del curado de los concretos y reducir también la temperatura de curado en 10 o 15 °C





La primera gráfica indica la influencia del cloruro de calcio sobre la resistencia del concreto curado a vapor para los diversos tiempos de tratamiento. Se trata de un cemento Portland # 3, con un consumo de 450 Kg/m^3 y con una relación agua cemento $\frac{A}{C} = 0.34$ La temperatura de curado = 80°C y duración de 6 horas.

La segunda gráfica ilustra la influencia del cloruro de calcio en la velocidad de endurecimiento.

En ese caso el consumo de cemento fue de 450 kgs/m^3 ,
 $\frac{A}{C} = 0.36$; $T = 70^\circ\text{C}$

La tercera gráfica es la influencia de (CaCl_2) sobre la resistencia del concreto curado en autoclave.

Obviamente el efecto acelerante del cloruro de calcio debe explicarse por el proceso de hidratación del clinker, si similarmente trabajan los nitratos de sodio y calcio y los hiposulfitos (16).

También podemos admitir en el cloruro de calcio un efecto como catalizador y así acelera la hidratación del C_3S y C_2S (Silicato tricálcico y Silicato dicálcico) sea en condiciones de curado normal o a vapor. Se han discutido en diversos escritos si el CaCl_2 reacciona con las ferritas y aluminatos presentes en el cemento Portland, o bien reacciona con el hidróxido de calcio durante la hidratación de los Silicatos de calcio. Un tercer punto de vista sostiene que su intervención es de forma indirecta como catalizador de un proceso relativamente lento. Es probable que los tres procesos

realicen, en todo caso aún no está suficientemente dilucidado. De experimentos realizados se ha podido concluir lo siguiente:

A) La causa del incremento de resistencia es en contraste con casi todos los puntos de vista formales, que el CaCl_2 incrementa el grado de hidratación de los silicatos de calcio.

B) El CaCl_2 acelera también el endurecimiento e incrementa la resistencia de los aluminatos tricalcicos.

C) El CaCl_2 en aluminatos libres actúa meramente como catalizador y permanece sin combinarse y esto ofrece peligro de corrosión para el acero de refuerzo. (15)

Se han fabricado cementos rápidos y de baja higroscopicidad utilizando CaCl_2 y manteniendo hasta el 1.5% de éste aditivo y 0.3% de algún agente higroscópico.

Existen otras mezclas activas:

Convinando cloruro de sodio con cloruro de calcio en igual proporción se obtiene mejor resultado durante las primeras horas. Ambas sustancias reducen el tiempo de fraguado, sin embargo se afecta ligeramente la resistencia final del concreto tratado.

El hidrosulfuro aluminato de calcio con yeso acompañado de la destrucción mecánica de las partículas (28) constituye otro medio atinado de acelerar el endurecimiento del concreto.

Igualmente son aditivos acelerantes del endurecimiento del concreto los cloruros de aluminio y de fierro, el tetraóxido de silicio y otros compuestos orgánicos como las sales de --

Triethanolamina. Los helectrólitos orgánicos aceleran la hidratación de los silicatos debido a la carga positiva de las partículas del cemento.

Con la adición de 1% en peso de cloruro de aluminio la resistencia última de compresión se incrementa en algunos casos hasta en 100%.

Con la introducción de 1% en peso de cemento de sulfato de aluminio en la mezcla del concreto la resistencia a las 24 horas se incrementa de un 23 a un 55 % sin disminuir la resistencia final.

El sulfato de sodio (Na SO_4) presenta grandes ventajas como aditivo, con una temperatura de curado de 95°C aumenta la velocidad de adquisición de resistencia de 2 a 3 veces. Una adición de 2% en peso, con una relación $\frac{A}{C}$ de 0.5 y curado con temperatura aumenta la resistencia 20% incluyendo la final, reduce el tiempo de tratamiento, aumenta la movilidad de la mezcla y tiene la ventaja de no producir corrosión (7 y 24).

Combinando (Na SO_2) con una pequeña cantidad de ácido acético (CH_3COOH) se obtiene una velocidad grande de endurecimiento, particularmente cuando el 15% de la mezcla activa se agrega al cemento (14)

El catalizador más común es el tri-etanol-amina, actúa en forma diferente con cementos de distintos tipos. Parece que es más efectivo con los cementos de alto contenido de C_3A , pero su acción siempre es menos eficaz como acelerante que la de la mezcla activa con CaCl_2 .

El proceso de inducción de gérmenes de cristalización se ha aplicado con buenos resultados pero éstos no son garantizables.

Los agentes de superficie activa actúan como almacenadores de aire reduciendo la reacción agua cemento y por tanto aumentando su resistencia (2).

Debemos señalar finalmente que existen normas de aplicabilidad general que siempre deberán observarse con los acelerantes ASTM 494 "Especificaciones Tentativas Para Agregados Químicos Para Concretos".

CALOR DE FORMACION

Como anteriormente hemos podido señalar el proceso de endurecimiento del concreto es una reacción química entre los diversos componentes del cemento y el agua de hidratación. La velocidad de ésta reacción depende entre otros parámetros de la movilidad que tengan los átomos de la mezcla. La velocidad de la reacción y por lo tanto la de formación de la estructura aumentarán a medida que se obtenga mayor movilidad en dichos átomos. Una técnica especial de aceleración en la adquisición de resistencia del concreto consiste precisamente en proporcionar movilidad a los átomos del concreto mediante temperaturas adecuadas durante el período de endurecimiento.

Al elevar la temperatura se producen efectos de tres tipos:

1) Un incremento de la energía cinética de los átomos y consecuentemente de su amplitud de oscilación. Esto aumenta la velocidad de formación de la estructura al incrementarse la velocidad de formación del número de uniones.

2) Al disminuir la viscosidad de la pasta por el aumento de la frecuencia de oscilación es posible reducir la relación agua cemento y por tanto incrementar la resistencia, o bien conservar la relación agua cemento y su resistencia aumentando la manejabilidad.

3) Aumenta la razón de hidratación de todos los constituyentes del clinker, sin alterar las reacciones. La resistencia obtenida para un grado de hidratación determinado se

mejora al incrementar en un rango adecuado la temperatura.

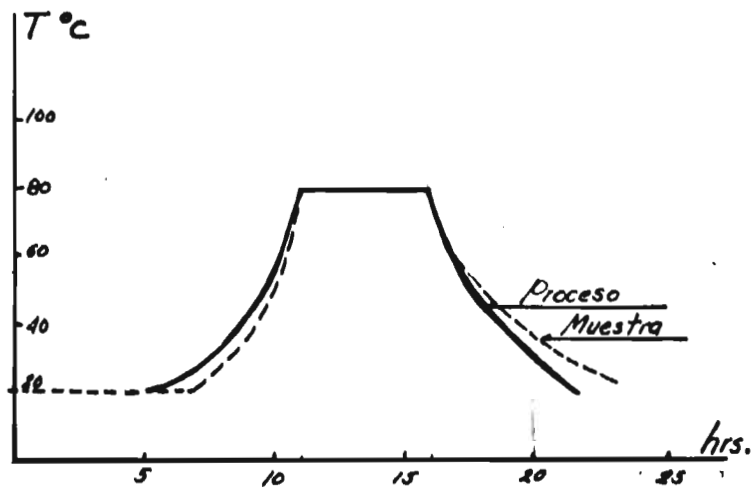
El principio es de gran simplicidad sin embargo se requiere de un procedimiento adecuado para lograr los efectos deseados. Así existen métodos para incrementar la velocidad de endurecimiento con diversas secuelas y diferentes fuentes de calor; tratamientos con vapor, calor seco con aire, con electricidad, con rayos infrarrojos, etc. (6) que a continuación veremos.

A) Tratamiento con vapor de agua: Entre las diversas fuentes que pueden utilizarse para alimentar con calor el proceso de hidratación de los componentes del cemento, el calentamiento con vapor de agua ocupa un lugar importante por la extensión de su uso y lo exhaustivo de la investigación de sus efectos, ya sea sólo o combinado con otros métodos.

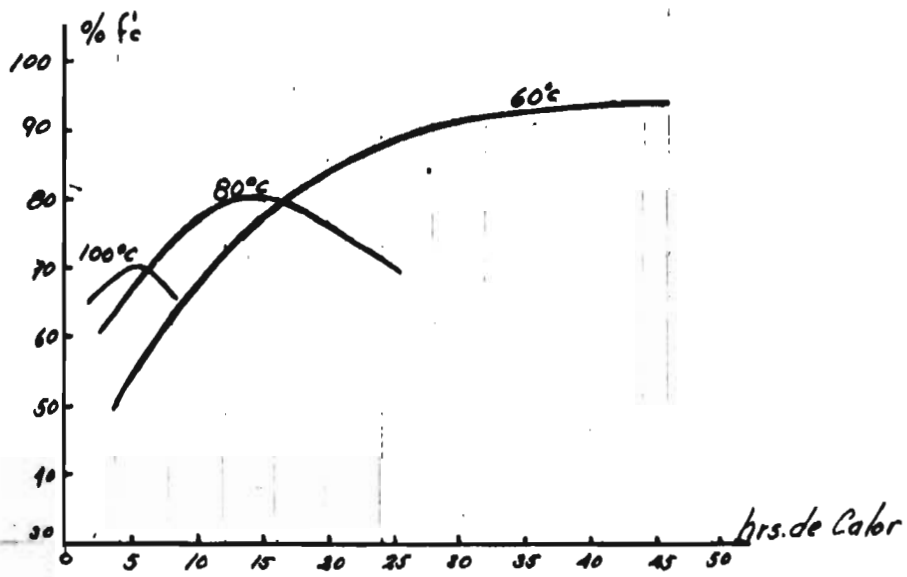
El procedimiento de calor a base de vapor de agua tiene la ventaja de mantener siempre la humedad que el concreto necesita durante su fase de endurecimiento para lograr una estructura fuerte y sana, a la vez que activa la formación de la estructura.

Debemos señalar que no conviene aumentar súbitamente la temperatura del elemento en proceso, el gradiente de elevación de temperatura debe ser cuidadosamente controlado para el buen éxito del propósito.

La curva mostrada en la figura nos da una buena idea del proceso de calentamiento. En términos generales podemos decir que no se debe alcanzar la temperatura de 50° C antes de 2 horas a partir del mezclado del cemento con el agua y la



Curva típica de tratamiento a vapor



Curvas de tratamiento isotérmico

temperatura de 100°C hasta pasadas las 6 horas del mezclado. Existen muchos procesos a los que han sido sometidos los concretos en elaboración y se presenta gran variedad de ellos que han alcanzado con éxito sus propósitos. Estos dependen del tipo de cemento, de la resistencia deseada, de los aditivos empleados y del propósito perseguido. Los valores que antes hemos fijado son un índice para no perder posibilidades de alcanzar la resistencia óptima del concreto con cualquier proporcionamiento, sin embargo bien puede suceder que para propósitos industriales de producción en serie de unidades de concreto pre-fabricados, interese más reducir el tiempo a un mínimo a costa aún de la resistencia final y del consumo de cemento.

Existen tipos de cemento que especialmente se prestan para éste tipo de tratamiento como son los que tienen un alto contenido de alita. El alto contenido de C S en la proporción de silicatos básicos produce asimismo mejores resultados. La oportunidad de utilizar altos contenidos de C A (hasta 15%) da lugar a resultados sorprendentes en la velocidad de endurecido con tratamiento de vapor aunque acarrea una fuerte pérdida de resistencia, la que tiene que frenarse con ácido sulfúrico anhidro, pero de ésta forma el tratamiento de calor se reduce en un tiempo considerable. Si no existe una limitación respecto al tiempo de endurecimiento por requerimientos de moldeo, camas de pretensión u otros motivos. Conviene aumentar el ciclo térmico de elaboración del concreto y obtener así una -

tendencia para el aumento de resistencia en temperaturas normales posteriores al tratamiento térmico.

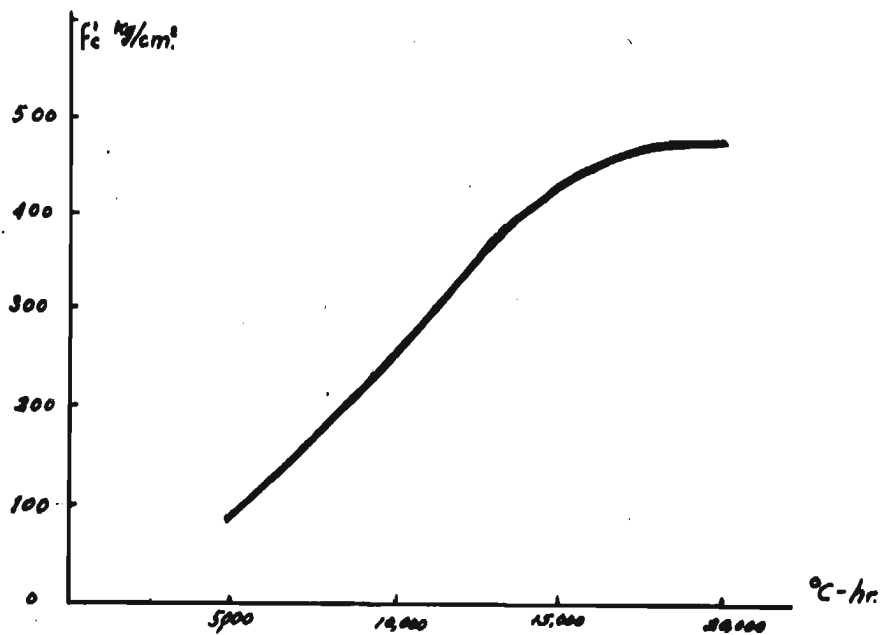
El término "madurez de Concreto" corresponde a la edad de curado a una temperatura dada $M = \int T dt$

T= Temperatura en °C

t= tiempo en horas

M= Madurez

La resistencia del concreto depende de su madurez dentro de las limitaciones de temperatura que hemos previsto. A medida que ésta madurez aumenta se obtiene ganancia en la resistencia. Sin embargo el tratamiento de temperatura máxima no puede ser muy prolongado si se ha adoptado una elevación rápida de temperatura, para obtener una alta resistencia temprana.



Falla de compresión vs. madurez

El progreso logrado en la reducción del período de tratamiento hidrotérmico es notable. Las altas temperaturas de calentamiento isotérmico son muy efectivas, puede decirse que la reducción del tiempo es ilimitada pero sus desventajas son también muy grandes.

Es necesario hablar también de los inconvenientes que éste método presenta: El equipo es costoso, el proceso es delicado y estricto en su observancia, la resistencia obtenida normalmente es insuficiente para mantener el fierro de refuerzo en condición esforzada y su resistencia final disminuye. (19)

Para los cementos portland, resulta inevitable una pérdida de resistencia potencial entre 25 y 60% de la resistencia del concreto del mismo proporcionamiento endurecido en condiciones normales. En concretos tratados con una razón moderada de incremento y caída de temperatura su pérdida de resistencia es moderada, pero para los tratados con elevación y caída rápida (del orden de 100°C en 2 horas) su pérdida es muy grande. Tales pérdidas pueden reducirse por prensados o tratamientos al vacío pero en general son inaceptables en la construcción práctica. Generalmente la ganancia de resistencia posterior prácticamente cesa y con frecuencia sobreviene una caída de dicha resistencia; de aquí que se requiera mayor contenido de cemento.

PENSION Y VAPOR DE AGUA

El método consistente en utilizar curado a vapor con cierta presión, está también profusamente extendido. Los experimentos realizados han demostrado que el tiempo más conveniente para la aplicación de éste proceso coincide con el tiempo de fraguado final del concreto y depende de las dimensiones de la probeta.

Una lenta elevación de la temperatura, en un concreto con baja relación agua cemento, con un prolongado período de curado con vapor y presión son bases firmes para alcanzar y aún sobrepasar la resistencia normal del concreto a los 28 días pero la secuencia y observancia de éste método es estricta y salirse de ella puede reducir la resistencia perjudicialmente (34). La combinación óptima de temperatura y presión en el curado asegura la posibilidad de adquirir en un tiempo reducido resistencias del 50 y hasta el 70% de la resistencia normal del concreto a los 28 días. Este método es eficaz y permite garantizar la resistencia final del concreto.

Tomando en cuenta la variedad de factores que intervienen en éste proceso para determinar un tiempo óptimo de curado con presión y vapor bien podemos explicarnos la variedad de opiniones de los distintos autores.

El curado de vapor con alta presión puede completarse en 24 horas. (37) Con presiones de 8 a 10 atms. y temperaturas hasta de 100°C lo que en algunas circunstancias puede reducir el costo de elaboración. (36) El curado de vapor con presio

nes excesivas (más de 50 atms.) es perjudicial pues reduce la resistencia.

VAPOR DE AGUA Y CLORURO DE CALCIO

Al utilizar CaCl_2 con curado a vapor se obtienen las mismas consecuencias acelerantes que en el caso del curado normal. Con ésta variante es posible obtener resistencias del 70a 80% de su resistencia final al terminar el ciclo de calentamiento al vapor que además se ve reducido respecto al ciclo de tratamiento térmico normal sin aditivos. (29)

En ciertos tipos de cementos como el de escorias la eficiencia de éste procedimiento es más notable pues la resistencia misma del concreto se ve incrementada hasta en un 100%.

Como hemos señalado el método de curado a vapor tiene serios inconvenientes, podemos citar entre ellos la limitación para actuar sobre concretos pretensados. Se considera que para éste tipo de estructuras, a una elevación de 1°C se pierden esfuerzos de tensión de $20\text{kg} / \text{cm}^2$ en el acero de presfuerzo y por tanto para altas temperaturas las pérdidas alcanzan de 1400 a 1600 kg / cm^2 lo que requiere un aumento hasta de 10% en el consumo de acero de presfuerzo.

Debemos señalar además que la adherencia entre fierro y cemento disminuye con el curado a vapor y que es muy dificultoso aplicar el tratamiento a estructuras de gran tamaño coladas in situ.

Debe ponerse especial atención al caso de moldes metálicos de que estos no originen un sobrecalentamiento que dañe

la estructura principalmente en el caso de previo calentamiento de los agregados. (33)

Un incremento en la Velocidad de calentamiento de unidades de concreto, se traduce en una perturbación de la estructura del concreto endurecido, observándose principalmente en la intensidad de la destrucción, y la presión que se suscita en el endurecido durante el calentamiento forma un capítulo importante en el proceso destructivo, que es el cambio de calor de las masas de humedad capilar en los poros de los cuerpos, y los esfuerzos causados por la expansión térmica de los materiales.

El análisis de los estudios realizados muestra que - la resistencia del concreto obtenida tempranamente por efectos de calentamiento afecta la intensidad de la destrucción, para evitar ésa limitación es conveniente establecer un curado antes del tratamiento de calor y aplicar presión externa al concreto que está siendo calentado.

CALOR DE FORMACION UTILIZANDO ELECTRICIDAD:

Otra de las fuentes de calor que es utilizada en la actualidad para aumentar la rapidez de adquisición de resistencia del concreto es la Energía Eléctrica.

Existen dos variantes principales de la utilización de la energía eléctrica para acelerar el endurecido del concreto.

A) Cuando el concreto se incorpora al circuito eléctrico como resistencia en cuyo caso el calentamiento es por con-

tacto directo.

B) Por el uso de corrientes oscilatorias de alta frecuencia, en cuyo caso el concreto es introducido al campo eléctrico sin contacto directo.

En la primera variante, puede lograrse el calentamiento eléctrico del concreto pasando la corriente por medio de electrodos aplicados a la superficie del concreto y su efecto es de aplicación de calor. Esta tiene la ventaja de acelerar la resistencia suministrando una temperatura uniforme. El método guarda grandes posibilidades en pruebas de resistencia rápida. (37)

Si pretendemos proporcionar calentamiento al concreto por medio de electricidad, el uso de voltaje está prohibido en el caso del concreto reforzado, sin embargo un proceso desarrollado en Vladivostok se apoya en ésta base. El problema ha sido resuelto rediseñando el refuerzo. En el caso del refuerzo convencional se forman zonas de calentamiento en las vecindades del acero y esto conduce a una evaporación intensiva del agua presente y que concluye con grietas longitudinales a lo largo del refuerzo. El fenómeno es explicable puesto que la conductividad del metal es aproximadamente 10^8 veces más alta que la de la mezcla del concreto.

En el citado procedimiento de Vladivostok la jaula de refuerzo del elemento colado ha sido substituído por dos texturas paralelas que no se conectan (sin ramificaciones laterales). Con éste arreglo del refuerzo, se forma un campo --

termo-eléctrico uniforme en el concreto, lo cual se presta para un tratamiento normal de calentamiento.

Para lograr el calentamiento de estructuras de refuerzo convencional puede pensarse en neutralizar el refuerzo por medio de chaquetas aislantes, ésto por supuesto es un proceso complicado en la preparación del refuerzo, pero es una forma de aplicación de calentamiento eléctrico, sólo deben de cuidarse las pérdidas de adherencia entre el concreto y el fierro de refuerzo. (22)

El endurecido del concreto por calentamiento eléctrico está basado en la transformación de energía eléctrica en energía calorífica. Lo anterior se logra conectando el concreto como resistencia en el circuito de frecuencia industrial por medio de electrodos. Como todos los componentes del concreto, con excepción del agua son malos conductores su conductividad dependerá entonces de la cantidad y calidad de la fase líquida. La resistencia eléctrica del concreto disminuye a medida que pasa el tiempo esto se debe a la disolución de los minerales del clinker.

Al elevarse la temperatura igualmente aumenta la conductividad, pero cuando el endurecido principia dicha conductividad disminuye por la reducción de la fase líquida.

Al ganar el concreto el 50 o 60% de su esfuerzo de diseño, la resistencia eléctrica se ha aumentado algunas veces y mantener la temperatura prescrita requiere un aumento considerable en la tensión. Como regla, cuando el concreto al-

canza tal resistencia eléctrica un mayor calentamiento no es adecuado pues consume gran cantidad de energía.

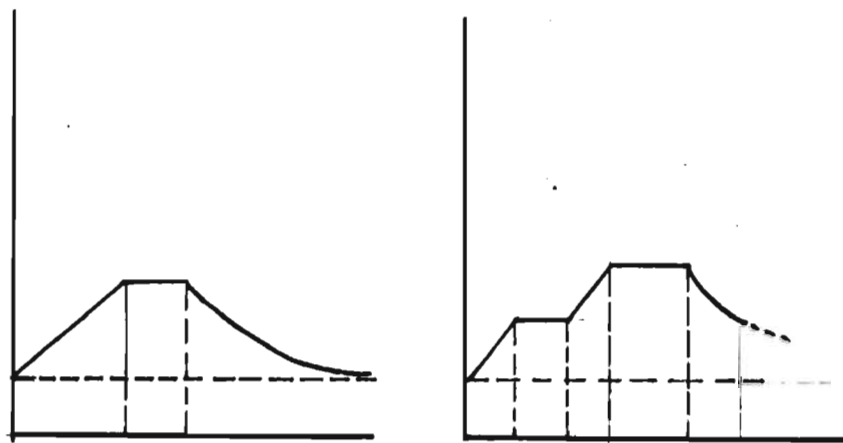
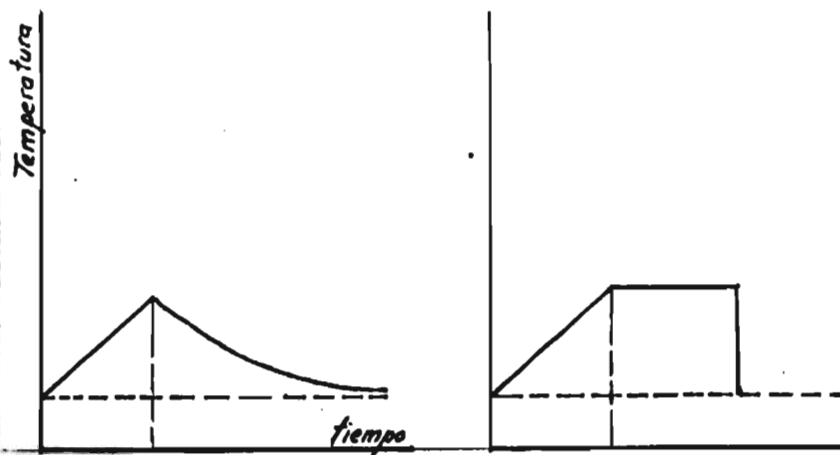
El curado eléctrico de las unidades es efectuado durante 5 horas y alcanza un endurecido a las 18 horas equivalente al normal de 3 días pero debe ponerse especial cuidado en mantener la humedad suficiente, durante el tratamiento eléctrico y así puede reducirse el término de erección de estructuras reforzadas coladas in situ.

La máxima temperatura de calentamiento depende del tipo de cemento y del módulo de superficie de construcción dentro del rango de 40 a 80°C. La razón de enfriamiento debe ser lenta, 10° por hora y en climas fríos de 3°.

Pueden usarse como electodos varillas o alambres en el caso de concretos masivos, y también vigas o columnas o bien alambres conectados en la jaula del refuerzo aislados al exterior, pero no deben usarse para calentar estructuras de más de 20 cms de espesor o para un tratamiento eléctrico periférico. Existe una experiencia favorable usando electodos laminados espaciados a 15 cms, conectados simultáneamente y el calentamiento eléctrico es efectuado por secciones.

El método hace posible aplicar un calentamiento directo del concreto en los espesores de las unidades y limita su expansión si se utilizan moldes cerrados de metal. Se pueden proponer las siguientes variantes:

- 1) Que comprende únicamente calentamiento del concreto seguido del enfriamiento. Se recomienda para calentar unida-



Esquemas típicos de Calentamiento Eléctrico

des en moldes cerrados en camas horizontales para estructuras con un módulo de superficie inferior a 5

2) Comprende dos períodos; Elavoración de temperatura y tratamiento isoterma, en éste caso la resistencia prescrita del concreto puede ser asegurada por el tiempo de acción de la corriente empleada. Se aplica para estructuras coladas in situ y concretos masivos con un módulo de superficie arriba de 12.

3) Comprende tres periodos; Elevación de temperatura, tratamiento isoterma y enfriamiento. En éste caso la resistencia prescrita es asegurada. Es adecuado para las estructuras colados in situ con módulo de superficie comprendido entre 6 y 12.

4) Consta de dos pasos; El calentamiento inicial para disminuir la expansión residual por temperatura del concreto y después la temperatura es elevada a un máximo necesario para un calentamiento isoterma. Este método se recomienda para reducir las pérdidas de tensión en unidades presforzadas.

La duración del tratamiento depende la resistencia requerida, del tipo de cemento, de la relación $\frac{A}{C}$, de la aspereza de la mezcla y de su compactación.

Para condiciones de producción de unidades reforzadas frecuentemente complicadas con instalaciones metálicas de moldeo, es necesario primeramente resolver el complejo problema de crear un campo eléctrico uniforme através de la unidad de concreto, así mismo deben ser resueltos los problemas de aislamiento.

Se demuestra que usando corriente de 20 C.P.S. el efecto de polarización ocasionado por el electrodo en el circuito desaparece completamente. Bajo la influencia del campo eléctrico la energía vibracional y rotacional se convierte en energía calorífica que acelera el endurecimiento.

La adición de pequeñas cantidades de CaCl_2 y de NaCl (de 0.5 al 1%) durante el curado eléctrico hace posible:

- A) Reducir el tiempo de calentamiento 1.5 veces.
- B) Emplear un período corto de un calentamiento eléctrico de alta temperatura con mayor reducción de tiempo y de precurado.
- C) Asegura que se obtenga la resistencia de diseño y el 70% de ésta después del tratamiento.
- D) Mejorar el calentamiento uniforme de las unidades debido al incremento de conductividad del concreto.
- E) Uso de bajo voltaje.

La elevación de temperatura del concreto con uso de corrientes de frecuencia industriales y aplicación de electrodos de placas planas alcanza la temperatura deseada através del columnen del producto tratado. (16)

En algunos casos al elaborar unidades de concreto precolado en plantas por el método de prefabricadas, el tratamiento de calor de alimentación interrumpida con potencia eléctrica y un valor variable de voltaje o con corriente de alta frecuencia parece ser conveniente.

Ciertas clases de concretos son razonablemente calentados

únicamente en un campo eléctrico de alta frecuencia para este tipo de calentamiento con corriente industrial las frecuencias oscilan en un amplio rango pudiendo ser usados de onda media y onda corta. Es conveniente utilizar mayores frecuencias de oscilación con las siguientes ventajas:

1) Incremento de temperatura simultánea y uniforme através de la sección del material homogéneo.

2) Ausencia de sobre calentamiento en las caras externas del material.

3) Ausencia de corrientes parásitos en el proceso de calentamiento y pérdidas por ese concepto, y facilidad en la regulación de temperatura de calentamiento de acuerdo a un diagrama predeterminado.

4) La posibilidad de calentar sin contacto directo de los electodos de corriente con el concreto.

5) El efecto específico del campo eléctrico de alta frecuencia, sobre ciertas clases de concreto, por ejemplo concretos con resinas, entonces las reacciones de policondensación y polimerización causantes del endurecido del concreto son acelerados en dicho campo eléctrico de alta frecuencia.

6) El mejoramiento de la cultura de elaboración y las condiciones higiénicas y sanitarias de labor.

El refuerzo en un campo eléctrico de alta frecuencia no recibe calentamiento directo y las parrillas de refuerzo aparecen protegidas por el concreto y son sujetas a calentamiento de menor rango. El consumo de electricidad en corrientes

de alta frecuencia para el calentamiento de concreto excede en 30 o 35% la electricidad usada con corriente industrial cuando las unidades de concreto aparecen conectadas al circuito como resistencia eléctrica. Sin embargo en algunas clases de concretos especiales puede obtenerse con alta frecuencia un consumo 30 a 40% menor del eléctrico usual.

Para ahorrar potencia eléctrica las unidades pueden ser conectadas en serie o en paralelo en corrientes industriales y de alta frecuencia.

El calentamiento rápido y uniforme en las mezclas voluminosas del concreto por alta frecuencia llega a 50°C, mientras que por corriente industrial es de 80 a 95°C.

En experimentos realizados la corriente de alta frecuencia es alimentada por un electrodo de metal situado sobre la probeta de 3 a 5 cm. de distancia en un plano superior sin contacto directo y la corriente industrial de 50C.P.S. es administrada a las probetas através de electrodos de metal de contacto de 10 a 15 cm., sobre la superficie abierta, con chaquetas de adbesto y con un período de enfriamiento de 6 horas.

Para obtener concretos más resistentes que los de diseño se calienta de nuevo para compensar las pérdidas de calor de 60 a 90 °C con un consumo relativamente pequeño de electricidad.

Esquemas de Calentamiento:

- 1) Calentado a 80°C con alta frecuencia más 14 horas de

curado por impulso.

2) A 50°C con alta frecuencia más corriente industrial de 220 V a 90°C más curado por 4 horas.

3) Alta frecuencia a 50°C más corriente industrial de 380V a 85°C más curado por 6 horas de calentamiento más curado por 4 horas.

4) Corriente industrial de 380 V a 90°C más curado por 6 horas más 4 de calentamiento. (17)

En éste método prácticamente el electrodo corresponde al molde con concreto fresco y el otro es una placa que se mueve sobre la superficie del concreto (26)

CALOR CON RAYOS INFRAROJOS

Entre los métodos adecuados de calentamiento se ha investigado el calentamiento de concreto promedio de rayos infrarojos.

Como fuentes de energía infraroja para tratar con calor el concreto se aplican generadores de tipo barra usando energía eléctrica o bien generadores de tubo.

El elemento de calor de generadores tubulares es una bobina en la que se coloca dentro la muestra. El calor de la parte central del generador es transferida al tubo calentándolo a una temperatura de 650 a 1000°K los cuales son emitidos en forma de energía radiante. Los generadores están 10 metros arriba y tienen una salida de potencia de 1Kw por metro.

Dichos generadores son altamente rugosos, resisten a fuertes choques dinámicos y a la vibración, pueden por tanto ser usados con ventaja en los sitios de construcción.

En generadores de tubos planos y de varilla el elemento de calentamiento es un alambre nichrome enrollado en derredor de una bobina de metal pudiendo tener diferente potencia de salida.

La duración de la radiación depende de la temperatura ambiente y es aproximadamente de 6.5 a 11 horas. El tratamiento isoterma es de $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ obteniendose 50 a 60% de la resistencia final requerida con un consumo de 130 KW hrs. por metro cúbico de concreto variando con el ambiente.

Debe prevenirse la excesiva evaporación con una protección

plástica y la aplicación de calor debe de seguir las curvas convencionales con incremento de calor, fase isotérmica y enfriamiento. El tiempo del tratamiento depende de la condición del ambiente. Este método ha sido aplicado a estructuras de gran volumen de cemento de una manera económica y eficiente.

El proceso de curado dura 85 minutos através de un túnel para elementos prefabricados enfriándose con un gradiente lento de temperatura. (26)

El método tiene las siguientes ventajas sobre el vapor:

- 1) Equipo de menor costo
- 2) Puede ser totalmente automatizado.
- 3) Instalaciones sanitariamente superiores
- 4) Reducción de la duración
- 5) Mejor utilización de moldes.
- 6) Menos consumo específico de calor. (10)

OTRAS TECNICAS DE CALENTAMIENTO

Se han probado con éxito otras técnicas de proporcionar calor de formación al concreto:

Uno de éstos procedimientos consiste en sumergir la undad de concreto fresco en aceite caliente cuya temperatura varía entre 70 y 100°C y después de un corto tiempo de curado se le reduce la temperatura. Como aceite se ha utilizado petróleo. Las unidades manufacturadas son curadas preliminarmente en condiciones normales por un tiempo aproximado de 8 horas. Después sus moldes son introducidos en petróleo caliente. La temperatura se eleva en una hora a 100°C y se mantiene ésta temperatura por otra hora para después reducir la a 70°C durante la tercera hora después de la cual se seca y desmoldea. Estos experimentos han encontrado endurecimientos en el concreto calentado con aceite al terminar el tratamiento equivalentes al endurecido normal a los 28 días además la superficie se vuelve impermeable y por tanto su durabilidad aumenta. También se comprobó que los valores posteriores de la resistencia alcanzada ya no disminuyen y que el concreto así tratado acepta todas las leyes del concreto endurecido en condiciones normales. (26)

Otro método de calentamiento empleado consiste en gases a diversas presiones. (24) El uso de tratamientos de vacío en la manufactura de miembros de gran tamaño disminuye el tiempo de tratamiento. Calentando el concreto que previamente ha sido tratado al vacío rinde mejores efectos obteniendo

OTRAS TECNICAS DE CALENTAMIENTO

Se han probado con éxito otras técnicas de proporcionar calor de formación al concreto:

Uno de éstos procedimientos consiste en sumergir la unidad de concreto fresco en aceite caliente cuya temperatura varía entre 70 y 100°C y después de un corto tiempo de curado se le reduce la temperatura. Como aceite se ha utilizado petróleo. Las unidades manufacturadas son curadas preliminarmente en condiciones normales por un tiempo aproximado de 8 horas. Después sus moldes son introducidos en petróleo caliente. La temperatura se eleva en una hora a 100°C y se mantiene ésta temperatura por otra hora para después reducir la a 70°C durante la tercera hora después de la cual se seca y desmoldea. Estos experimentos han encontrado endurecimientos en el concreto calentado con aceite al terminar el tratamiento equivalentes al endurecido normal a los 28 días además la superficie se vuelve impermeable y por tanto su durabilidad aumenta. También se comprobó que los valores posteriores de la resistencia alcanzada ya no disminuyen y que el concreto así tratado acepta todas las leyes del concreto endurecido en condiciones normales. (26)

Otro método de calentamiento empleado consiste en gases a diversas presiones. (24) El uso de tratamientos de vacío en la manufactura de miembros de gran tamaño disminuye el tiempo de tratamiento. Calentando el concreto que previamente ha sido tratado al vacío rinde mejores efectos obteniendo

se con temperaturas de 45°C alta resistencia a las 24 horas.

V I B R A C I O N

El efecto de vibración mecánica en una mezcla de concreto aplicada durante el período de coagulación intensifica el endurecido contribuyendo a la formación de los cristales. (13)

La vibración múltiple y repetida al concreto durante el primer día logra doblar la resistencia del concreto elaborado al cabo de 24 horas respecto al concreto endurecido sin vibraciones, e incrementa la resistencia final del concreto hasta en un 20%. Una mezcla de concreto bien preparada y consolidada por medio de vibro-compactación (vibración con carga adicionada) al cabo de las primeras 24 horas alcanza resistencias del orden del 30 o 40% de la resistencia que el mismo concreto alcanzaría a los 28 días en condiciones de endurecido normal. (18)

El efecto benéfico del vibrado y re-vibrado es atribuido a la remoción de esfuerzos internos durante la formación de la estructura cristalina del concreto. (33) Durante el primer período de formación de dicha estructura, es necesario lograr un máximo número de contactos entre las partículas de la mezcla. Es decir la consolidación de la mezcla debe ser máxima. Cuando la vibración se aplica una vez que el fraguado de la mezcla ha empezado, logra romper las primeras ligas que entre las partículas se van originando y logra un reacomodamiento de todas ellas de ésta manera las nuevas ligaduras que se originen serán más numerosas por tener mejor con-

tacto entre partículas y más uniforme si se originan en iguales condiciones y son de la misma edad.

Para estos efectos son de gran utilidad los (39) rodillos vibro-prensadores con los que se obtiene un aumento notable en la adquisición de resistencia y en el valor de la resistencia final del concreto endurecido. Además cuando se combinan los efectos de prensado y vibración la manejabilidad no necesita ser grande ^{puede} ~~per~~ la carga aplicada ^{se} va acomodando el material durante la vibración. En tales circunstancias la relación agua-cemento puede reducirse a un mínimo lo que redundará en mayor resistencia de los concretos así elaborados.

Se han experimentado procedimientos con vibraciones de alta frecuencia en los que intervienen dos intensidades diferentes 8,400 y 12,000 vibraciones por minuto. con este procedimiento se ha conseguido acelerar el endurecimiento del concreto 1.5 veces más que con las vibraciones normales de 3,000 ciclos por minuto. (33,36)

En el caso de utilizar los procedimientos de vibración se ha encontrado en las investigaciones efectuadas, que la velocidad de adquisición de resistencia de los concretos que tienen acelerantes químicos se aumenta y permiten obtener resistencias elevadas a las 24 horas sin utilizar tratamientos térmicos. (16)

FINURA DEL MOLIDO DEL CEMENTO

A mayor finura del cemento más intensa y rápida es la hidratación.

Por su tamaño extremadamente pequeño las partículas más finas no pueden ser separadas para que pasen através de los tamices metálicos y por eso se han ideado varios métodos para hacer estimaciones cuantitativas. La medición de finuras se hace determinando la superficie total de todas las partículas de un gramo de cemento, suponiendo que éstas sean de forma esférica.

Esta área llamada "Superficie específica" es mayor conforme el cemento es más fino, y queda comprendida entre 1700 a 2200 cm^2 por gr. Es preciso recordar como aumenta la suma de las superficies de las partículas sólidas, correspondientes a un volumen determinado, conforme el sólido se divide una y otra vez.

Por ejemplo; la superficie que corresponde a un cubo de un decímetro cuadrado por lado, con volumen de 1 litro es $6 \text{ dm}^2 = 0.06 \text{ m}^2$, si cada arista se divide en 10 y se corta el sólido en planos paralelos a las caras del mismo, por las divisiones de las aristas, se tendrán mil centímetros cúbicos y cada uno de éstos cubos tendrá una superficie de 6 cm^2 la suma de todas éstas superficies será $1000 \times 6 = 6000 \text{ cm}^2$ o sea 0.6 m^2 es decir diez veces mayor que la superficie del sólido sin dividir y así sucesivamente.

Un gramo de cemento, con peso específico de 3.15 ocupa

un volumen de $\frac{1}{3.15} = 0.317$ de cm^3 y un cubo macizo de éste volumen tiene un área aproximada de 0.3 cm^2 . Es decir que en la superficie se aumenta una 7000 veces.

Los polvos inpalpables contienen entre sus granos cierta cantidad de aire microscópico por adherencia, que produce fuerzas cohesivas.

El efecto favorable de la finura del cemento en la velocidad de endurecimiento del concreto se debe a que es más grande el número de geles que se formen a edades tempranas, y por lo tanto es mayor la resistencia inicial del concreto, pero a su vez la presencia del gel del cemento retarda la hidratación.

Por tanto una finura extrema del cemento, que da lugar a una formación excesiva del gel, es eficiente en los primeros 7 días pero su influencia es muy débil a los 28 días y llega a desaparecer por completo al cabo de cierto tiempo.

Por otra parte las partículas gruesas (más de 60 micras de diámetro) no son capaces de completar su hidratación, aún en presencia de suficiente agua capilar y de muchos años de curado con agua, porque el espesor de la capa del gel impide la hidratación del núcleo.

Entonces con una finura de molido normal y a una mala calidad de mezclado, una parte considerable de cemento no participa formando nuevas uniones quedando prácticamente como material de relleno.

Para lograr que todo el cemento utilizado realmente se

hidrate y pase a formar parte activa en su totalidad como aglutinante es necesario un incremento en la finura de molido del cemento utilizado. Si se acepta que la reacción entre sólido y líquido depende de la superficie específica del sólido, a una mayor finura corresponde mayor reactividad. En efecto en los cementos más finos se requiere mayor cantidad de yeso para contratestar la hidratación tan rápida y la formación de películas sobre los granos del cemento, pudiendo de esta manera obtener una resistencia mayor. (12)

El uso de cementos de una alta finura de molido al principiar la hidratación tiene una gran velocidad de endurecido. Esto no es muy conveniente, pues origina esfuerzos internos en el concreto que reducen la vida de los elementos fabricados. Por éste motivo debe limitarse la velocidad de hidratación inmediata.

El molido del cemento lleva consigo efectos como el de aumentar la relación óptima agua cemento esto se debe a que aumenta la superficie específica y con ella los requerimientos de agua. (18)

El cemento portland remolido con arena tiene una superficie específica de $5000 \text{ cm}^2/\text{gr}$. y el incremento en la resistencia del concreto que con él se elabora es de 1.5 a 2.5 veces al tiempo de fraguado, respecto del cemento normal ($2700 \text{ cm}^2/\text{gr}$) y a las 24 horas su resistencia es tres o cuatro veces mayor. (18) Este tipo de molido en el cemento permite preparar cementos de alta resistencia.

El cemento como venimos explicando necesita tener un alto grado de finura de molido, y cuando ésto se consigue se obtiene también junto con la resistencia un gran acortamiento del tiempo de endurecido.

Conviene resaltar que resulta costoso obtener superficies mayores de $5000 \text{ cm}^2/\text{gr}$, los ordinarios varían entre 2700 y $3200 \text{ cm}^2/\text{gr}$.

En el proceso de mezclado los granos de arena sirven como demoldores y nuevas superficies tienen interacción con el agua, y gracias a éste proceso de hidratación es intensificada, y como resultado de ésta activación la mezcla en endurece más rápidamente.

En muchas mezclas de concreto para tener una trabajabilidad adecuada utiliza una cantidad de cemento portland mayor de la requerida para lograr la resistencia deseada. Este problema puede resolverse utilizando puzolánicos o cementantes finamente divididos que contribuyen al desarrollo de resistencia del cemento y que al utilizarse requieren una cantidad de cemento considerablemente menor para producir una resistencia especificada sin menoscabo de la manejabilidad de la pasta (40)

La resistencia temprana de algunos clinkers puede ser mejorada en un 20 o 25% moliendo los agregados inertes con clinker y yeso. La razón es que el pétreo actúa como triturador, obteniendo mayor finura y en algunos casos el pétreo no es completamente inerte. (12)

Por la baja resistencia en condiciones normales que desarrolla el cemento portland de escorias respecto al cemento portland normal, aquel generalmente es considerado indeseable, sin embargo se ha demostrado que ambos son equivalentes, si al cemento de escorias se incrementa su superficie específica a $4000 \text{ cm}^2/\text{gr}$. En condiciones de curado hidrotérmico los cementos de escoria alcanzan resistencias aún mayores.

C O N C L U S I O N

En las páginas anteriores hemos propuesto tratamientos que han logrado con éxito disminuir el tiempo de endurecido del concreto, de manera que su periodo de fabricación se ve notablemente reducido respecto del periodo normal de endurecimiento de los concretos.

Cada uno de los tratamientos expuestos tiene sus cualidades particulares y sus limitaciones, pero alcanza siempre su objetivo y es muy deseable llevarlos al campo práctico de la construcción en cualquiera de sus expresiones.

También adelantamos las posibilidades obtenidas con la combinación racional de dos o más de los tratamientos expuestos en sus diferentes variantes; aditivos + calor de fogación, aditivos + vibración etc.

Por lo tanto en la obra será necesario plantear una escuela adecuada enfocada a reducir el tiempo de fabricación, a lograr mayor economía y a obtener mejores concretos, de acuerdo con las características especiales en cada caso.

BIBLIOGRAFIA

" INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROBLEMS OF ACCELERATED HARDENING OF CONCRETE IN MANUFACTURING PRECAST REINFORCED CONCRETE UNITS "

Rilem Publications

- 1.- K. A. Glukohouskoy N A Harylov A. M. Polishohuk. "control of Concrete Hardening Processes".
- 2.- L. A. Keiser. "Kinetics of Hardening of Portland Cement Under Steam -Curing Conditions".
- 3.-P.C. Balatjev, V.A. Sokolov. "Acted of Concrete Hardening by using vertical Battery Technics of Manufring Precast Concrete Structures".
- 4.- L. Palotas, Gy Balazs, J. Gemesi (Hungary) "Investigation of Concrete Hardening Buring Steam-Curing by non destructive tests".
- 5.- Z. Rensdorf. "Influence of composition of Portland Cements on the result of steam- curing. Aceleration of -concrete hardening by heating the concrete grout".
- 6.- Ju. B. Monfred, Ju. P. Kljushnik, S. D. Seldberberg J. M Furaeva. V.I. Sheronov, Ju. P. Vinarskyi. "Use of electring curing in manufacturing reinforced concrete panels in vertical battery instalation."
- 7.- D.E. Gorbachov R.V. Krjukov. A. M. Mihkanovski. "Some Problems of Aceleration of Concrete Hardening in Manufac turing Panels in Vertical Position".
- 8.- V. N. Ganin. "Investigations Into Conditions of Hardening Heavy Weight Concrete at Electric Curing".
- 9.- Z. Reinsclori. "Propieties of Autoclaved Heavy Concrete"

- 10.- N.N. Danilov "Heat Treatment of Precast Reinforced Concrete by Infrared Rays".
- 11.- I.V. Kravchenko "Use of Rapid Hardening and High Strength Cements for Acceleration of Concrete Hardening".
- 12.- R.W. Nurse "Physico Chemical Fundamentals and Methods of Acceleration of Concrete.
- 13.- Ju. M. Butt, V.V. Temachov, L.A. Lukatzkoya. "Acceleration of Cement Hardening at Temperatures of 20 to 100°C"
- 14.- U.A. Ayapov "Catalysis and Acceleration of Concrete Hardening.
- 15.- Investigation into the Mechanism of Calcium Chloride -- Effect in Case of Natural and Steam Curing Condition".
- 16.- Silvertsev, Laphia, Nikitina, Ukhova. "Experimental data for Explanation of accelerating Effect of Additives on Cement Hardening".
- 17.- N.N. Dolgoplov. "High Frequency Heating in Manufacturing Reinforced Concrete and Concrete Units".
- 18.- A.S. Koonilov, A.V. Ststalkin, V.A. Senchenko. "Hardening Acceleration of Fine Grained High Strength Concretes at all Stages of Technological Process of Manufacturing - Precast Reinforced Concrete Structures".
- 19.- L.A. Semenov N. S. Podurovsky, N. N. Volkovsky "Heat - Moisture Treatment of Concrete in Pressurless Steam-Curing Chambers".
- 20.- L.A. Keiser, N. B. Morjamov, L.I. Ponfilova "Temperature Gradients in Concrete of Precast Structures Subject to Steam Curing and Their Influence on Concrete Quality and Durability".
- 21.- B.G. SKRAMatayev; A.M. KHigerovih. "Rapid Hardening Cement with Calcium Chloride Additives".

- 22.- R.V. Wegener "On Effect of Reinforcement on the Process of Electric Curing Haydite Concrete Wall Panels".
- 23.- I.D. Zaporozhets, S.D. Okorokov A. A. Paryiskyi. "Investigations Into Heat Evolution of Concrete as a Factor to be Considered in Setting Acceleration Conditions of Concrete Hardening
- 24.- Kopyciski "Acceleration of Concrete Hardening with vacuum Preheating".
- 25.- "R.K. Lewis "Optimum Steam Curing Treatment of Concrete"
- 26.- J. Stork, "New Methods of Accelerated Hardening of Concrete".
- 27.- C.E. Goryaniov, E.C. Viksler. "Investigation Into Methods of Accelerated Hardening of Structural Haydite Concrete".
- 28.- Ratinov, Rozenvreg, Smirnova. "Mechanism of the Effect of Additives Accelerators of Concrete hardening".
- 29.- Balazs (hungary) "Effect of Calcium Chloride on the Strength of Steam-cured Autoclaved Concretes".
- 30.- R. A. Shchekanenko. "Investigation Into Methods of Accelerated Hardening Structural Haydite Concrete".
- 31.- S.A. Mironov. Further Development of Electric Curing of Concrete".
- 32.- S.M. Royak. A. F. Cherkaova, E.T. Jashina. "Influence of Hidro-Thermal Curing on Hardening of Portland -Slag Cement".
- 33.- A. E. Oesov, I. A. Sevetinskaja. "Development of Technology of Manufacturing Rapid Hardening concretes Without Heat-moist Treatment".
- 34.- N. Karapchansky A. Pejev. (Bulgaria) "Study of Some - Problems Relating to Steam-Curing of Concrete".

- 35.- P. I. Bozhenov, V I Kavalerova, "Cements of Autoclave Hardening"
- 36.- S. A. Mironov. "Some Generatizations in Theory and Technology of Acceleration of Concrete Hardening".
- 37.- H. F. W. Taylor. (Academic Press) "The Chemistry of Cements"
- 38.- J. Rhia. "Ways of Maximum Time Reduction of Concrete Hardenig"
- 39.- A. M. Neville. "Properties of Conocrete "Pitman
- 40.- A. C. I. Journal Nov - 1963 "Admixtures for Concrete"
- D. F. Orchard. "Concrete Technology" Jhon Willey and Sons Inc.
- A. C. I. January - 64. Boundy and Hondors. "Rapid Field Assesment of Strengt of Concrete by Accelerated Curing"
- Ross A. D. "Some Tests of Electro-Cured Concrete". The Engin eer vol 198, No. 5153, Oct.
- Robert F. Blanks, Henry L. Kennedy. "Adition and Admixtures" pp 231. Jhon Willey and Sons Inc.
- A. C. I. March 1952. Shideler. "Calcium Chloride in Concrete".
- A. de Neymet "Aditivos para Concreto".