

FACULTAD DE ARQUITECTURA

5
666.97.03
031 m

0
ej 2

UNIVERSIDAD DE CHILE

INSTITUTO DE EDIFICACION
EXPERIMENTAL. -

Coaut.

~~03716~~

SEMINARIO

MÉTODOS DE ACCELERACION DE LA
FRAGUA Y EL ENDURECIMIENTO
DEL HORMIGON



PROFESOR GUIA

Arq. Francisco Aedo.

PROFESOR AYUDANTE

Arq. Raquel de Pérez.

ALUMNO

Félix Osegueda J.



1959

PROGRAMA

CAPITULO I

INTRODUCCION

CAPITULO II

FRAGUA Y ENDURECIMIENTO

- 1.- Fenómenos físicos y químicos del proceso..... 4
- 2.- Teorías específicas..... 7

CAPITULO III

RELACION AGUA CEMENTO

- 1.- Definición..... 9
- 2.- El agua en la plastificación y en la reacción de endurecimiento..... 9
- 3.- Efectos sobre:
 - a).- La rigidez del hormigón fresco..... 10
 - b).- El tiempo de fraguado..... 11
 - c).- La resistencia..... 12
 - d).- Duración e impermeabilidad..... 12
 - e).- La variación volumétrica..... 13
 - f).- La elasticidad..... 13
 - g).- La conductividad térmica..... 14
 - h).- El peso específico..... 14
- 4.- La Compacidad, la relación a/c y la resistencia inicial..... 15

CAPITULO IV

METODOS DE ELEVACION DE LA RESISTENCIA INICIAL..... 19

- 1.- Reducción de la relación a/c:
 - a).- Disminución de la tensión superficial del agua..... 20
 - b).- Arrastre de aire..... 24
 - c).- Compactación mecánica..... 28
 - d).- Tratamiento al vacío..... 31
- 2.- Curado al vapor..... 36
- 3.- Aumento de la superficie específica del cemento..... 39

4.- Agregados aceleradores.....	41
5.- Composición química de los cementos.....	44
6.- Puzzolanas.....	50
7.- Conclusiones.....	53

CAPITULO V

ESTUDIO EXPERIMENTAL, POR MEDIO DEL CENTRIFUGADO, DE LOS EFECTOS DE LA RELACION A/C EN LAS RESIS- TENCIAS INICIALES DEL HORMIGON.....	56
--	----

CAPITULO I

INTRODUCCION

" Estimo que la técnica y la arquitectura del hormigón se encuentran todavía en sus etapas iniciales, y en una fase de plena evolución.

" Numerosas características tecnológicas de este material nos son todavía desconocidas, y un gran número de sus posibilidades estructurales y arquitectónicas se encuentran bajo profundas dificultades de realización, porque revolucionan las concepciones constructivas tradicionales.

" Para acelerar el progreso de este material maravilloso, creo que se debe trabajar intensamente sobre los puntos siguientes:

"I.- Estudio de las propiedades y características del hormigón respecto a la granulometría, las cualidades de los agregados, las cantidades de agua y los métodos de elaboración.

" II.- Aprovechamiento de las diversas técnicas que han aparecido en el curso de los últimos años, considerándolas como algo más que simples elementos de ejecución, y tomando conciencia absoluta de que sus características contribuyen a determinar el esquema estático, el rubro constructivo y el aspecto arquitectónico de una obra. "

PIER LUIGI NERVI
¿donde y cuando dijo esto?

La elevación de las resistencias del hormigón es un problema en el que aún no se han agotado todas las posibilidades que ofrece la técnica moderna; aún más, el conocimiento de la fenomenología del material no ha madurado hasta hacer permisible un dominio absoluto de sus cualidades. Se ha progresado evidentemente en factores circunstanciales de su técnica; pero la mayor parte de sus problemas se encuentran aún sin resolver, tanto en el aspecto estático resistente, como en su complejo constructivo.

De este último específicamente, se mantiene oscuro y como factor negativo sobre los avances circunstanciales de su técnica, tales como la pre-fabricación, o la racionalización de sus métodos de elaboración, el plazo requerido para que el hormigón ,

desde que se le prepara, adquiriera las cualidades mecánicas para las que se condiciona su uso.

Se puede afirmar que el hormigón está en una etapa en la que su técnica ha debido condicionarse a todos los fenómenos que constituyen el concepto moderno de industrialización; pero, los avances obtenidos en este aspecto, han provocado un descuido en la evolución de la técnica intrínseca del material; y así se constata, por ejemplo, la contradicción del gran avance que significa una estéro-estructura, manteniendo para su ejecución las mismas grandes desventajas que para cuando la técnica del hormigón se encontraba en estado incipiente; tal es el caso de la conservación por largo tiempo del preparado en los moldajes, en condiciones para las que el factor tiempo significa un gran valor de organización y de economía.

Lo mismo sucede en la actual industrialización del material, en la que, al factor tiempo, se suma el costo económico de la inversión en moldajes y encofrados, inversión esta que se considera muerta mientras el preparado no alcanza condiciones de rigidez o resistencia suficiente como para permitir su manejo o pronta utilización.

En obras, tanto de Ingeniería como de Arquitectura, los largos plazos de permanencia en los encofrados significan además, el impedimento o el atraído de faenas complementarias.

A partir de la última guerra mundial, la premura con que se requería ejecutar grandes reconstrucciones, puso en evi

dencia lo parsimoniosa que era la preparación de un hormigón hasta el alcance de las resistencias que se les solicitaban; y vino a acentuar aún más esta deficiencia el alto crecimiento demográfico de la población mundial y la necesidad consecuente de atender la siempre creciente demanda de vivienda.

El pronto alcance de resistencias en el hormigón, tiene pues, gran valor en la época actual; y aunque existen métodos para lograrlo, se verá en el curso de este trabajo que muchos de ellos, o son sucedáneos, o cumplen bajo muchas reservas con el objetivo perseguido.

Se destacarán aquí aquellos procedimientos que hayan surgido, con pureza, de la fenomenología intrínseca y elemental del material.

CAPITULO II

FRAGUA Y ENDURECIMIENTO DEL CEMENTO

Definición.-

Al ponerse en contacto bajo condiciones normales agua con un aglomerante, los componentes anhidros de éste se disolverán o hidrolizarán a partir de sus elementos más solubles o hidrolizables (álcalis, aluminatos, etc., en el caso del Portland) dando una pasta en la que, dada la pequeña cantidad de agua presente , se tendrá una disolución de cierta concentración iónica, determinada por la del ión hidróxilo OH, dado el carácter básico de los componentes.

Por consiguiente, en el aglomerante sometido al proceso de fraguado, podemos objetivizar dos características esenciales que dan lugar a la fenomenología intrínseca del fraguado: uno es la disolución resultante, y el otro es el apareamiento de una resistencia mecánica creciente a medida que evoluciona el sistema, que dá textura a la fase sólida del proceso.

El Proceso.-

Desde que termina el amasado de la pasta, hasta que comienza el fraguado , la composición y concentración de la disolución, y la textura de la fase sólida,

apenas se manifiestan como factores separados y no experimentan variaciones apreciables. La fenomenología del sistema es débil y casi constante hasta el momento del inicio del proceso.

Durante este, cristalizan los productos de hidratación, separándose físicamente de la disolución, a la cual pasarán nuevos productos anhidros para restablecer el equilibrio, prosiguiendo el proceso hasta que todos los componentes anhidros han pasado a la disolución, y de esta han cristalizado todos los hidratos correspondientes.

Tan pronto comienzan a efectuarse las cristalizaciones, el agua combinada que pasa a la fase sólida aumenta, el agua restante en la disolución disminuye, y la textura de la fase sólida empieza a modificarse. En la disolución aumentarán la concentración y la viscosidad, y en la fase sólida aumentará simultáneamente la rigidez.

Durante el fraguado de un aglomerante del tipo del cemento Portland, tiene lugar un desprendimiento de calor que provoca una elevación de temperatura, que hace disminuir la viscosidad de la disolución, acelerando el paso de los elementos hidratados a la fase sólida. Este desprendimiento de calor es tanto mayor cuanto mayor sea el contenido de aluminatos, en la composición del aglomerante, y tanto menor cuanto mayor sea la cantidad de agua presente.

Una vez finalizado el fraguado, la pasta entra en el período de endurecimiento, en el que se mantiene la evapora -

ración y el consumo del agua retenida por la fase sólida, única ahora en el sistema.

Además de las reacciones químicas entre los constituyentes del cemento y el agua, se producen también fenómenos hidrolíticos que quitan a la reacción las apariencias externas de química, puesto que, en lugar de producirse según proporciones fijas y determinadas, ocurre que la cantidad de agua combinada para un peso fijo de cemento, es variable, además de otros factores, con la cantidad de agua de amasado. Esto se explica por el hecho de que los silicatos al combinarse con el agua pierden basicidad, desprendiéndose hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , y si el agua de amasado está presente en abundancia, forma en ella una disolución muy diluida, y por tanto, iónica en su casi totalidad; mientras que si el agua de amasado es escasa, no absorberá toda la Ca(OH)_2 desprendida, por ser pequeño el coeficiente de solubilidad, formándose una disolución saturada de escasa ionización; las circunstancias de las reacciones son pues, ~~completamente~~ ~~completo~~, completamente diferentes, influenciadas además por la pequeña solubilidad, y por tanto, gran ionización de los hidrosilicatos e hidroaluminatos, que a su vez depende también de la cantidad de agua presente y de las sustancias en ella disueltas. Estas influencias mutuas no son solo cualitativas, sino también cinéticas, o sea que intervienen las velocidades con que se desarrollan los fenómenos, función de las mismas variables antes citadas.

Teorías Es-
pecíficas.-

Las dos teorías primeramente desarrolladas para la explicación del fraguado eran, la de la cristalización perteneciente a Le Chatelier, y la de la gelatinización, de Michselis; según la primera el endurecimiento se produce de un modo semejante al del yeso, y según la segunda como el de las colas. Hoy día, merced a observaciones microscópicas röntgenográficas, se ha comprobado la simultaneidad de los dos fenómenos; en efecto, las primeras apreciaciones que pueden hacerse ante el microscópio, consisten en manifestaciones cristalizaciones, primeramente en forma de agujas que parecen ser de hidroxaluminato mono o bicálcico, y en seguida cristales de hidrosilicato bicálcico; poco después aparecen los cristales bien definidos de hidróxido de calcio, y más tarde, láminas exagonales de hidroxaluminato tricálcico. A continuación viene un segundo tiempo en el que se observa la formación progresiva de un gel que llega a abarcar la totalidad de la masa; este gel está constituido por SiO_4H_4 , o disolución coloidal de SiO_2 ; por último empiezan a aparecer cristalizaciones menudas en las porosidades del gel, que van aumentando en su formación de un modo muy lento.

En resumen, en el proceso se distinguen dos fases; la primera rápida de cristalizaciones que corresponden al período de fraguado, y la segunda, lenta, de gelatinización, que determina el endurecimiento. Estas fases se acusan perfectamente en las curvas de temperatura del proceso, en las que se destaca un primer período de ligera elevación que luego se

mantiene constante, y que corresponde precisamente al intervalo de penetración de la aguja de Vicat, midiendo por tanto la rapidez de fraguado; sobreviene después un peralte muy pronunciado, sumamente brusco en los cementos aluminosos, menos en los supercementos y bastante menos en los Portlands (máximos de alrededor de 100° , 70° , y 60° respectivamente) existiendo franca correspondencia de esta fase con el mayor volumen de cristalizaciones observadas. Queda por último un tercer tramo de la curva, que en condiciones adiabáticas es creciente, de muy poco peralte y que corresponde al período de gelatinización.

Este proceso se efectúa a expensas de los granos más finos del cemento envolviendo la gel formada los cristales del fraguado, aislándoles del contacto con el agua antes de que se hubieran acabado de formar. A continuación la hidratación que sigue tiene lugar a expensas del agua del gel, el que se va desecando poco a poco hasta el endurecimiento total del conjunto, que quedará definitivamente constituido por cristales envueltos en un gel seco y endurecido.

CAPITULO III

RELACION AGUA CEMENTO

Definición.-

La relación agua cemento (a/c) es la razón, en peso, de las partes de agua y cemento con las que se prepara un aglomerado. Esta relación, o sea, la cantidad de agua añadida para el amasado de la mezcla, es el factor decisivo de la resistencia de un hormigón, considerándose precautadas las demás condiciones de ejecución.

Este agregado al hormigón cumple dos funciones: conferir al hormigón sus propiedades de estado fresco, o sean, su trabajabilidad, capacidad de compactación y plastificación; y provocar la reacción de endurecimiento del aglomerante.

Cantidad

Combinada.-

La cantidad de agua fijada en la reacción de fragua y endurecimiento, para un peso fijo de aglomerante, varía según las características del cemento en cuanto a finura y composición química; y las con-

diciones de preparación del hormigón, y su edad. Se considera que solamente un 10 % del agua total de amasado entra en la combinación.

La tabla siguiente, elaborada en el Research Laboratory of the Portland Cement Ass. dá la cantidad de agua combinada con relación al cemento en función de la edad y del agua de amasado.

Porcentaje en peso de cemento seco, de agua retenida en pasta desecada a 115°C.

a/c	DIAS					
	1	3	7	14	28	90
0,3	4,1	6,3	8,3	8,8	9,7	10,6
0,4	5,0	7,7	9,8	10,5	11,7	13,0
0,6	5,7	8,6	10,8	11,7	13,0	14,6
0,7	6,2	9,2	11,5	12,6	13,9	15,8
0,9	6,6	9,6	11,9	13,3	14,4	16,7

La cantidad de agua que no interviene en el proceso de fragua, determina la porosidad del cemento endurecido, el que alcanza una resistencia tanto menor cuanto más poroso resulte.

Influencia en la rigidez del hormigón fresco.-

La cantidad de agua de amasado es directamente proporcional a la fluidez resultante, Según el descenso del hormigón en el cono de Abrams, el IDIEM lo clasifica en siete categorías, desde seco, caracterizado por un descenso comprendido entre 0 y 2 cm, hasta sopa, con un descenso mayor de 20 cm.

Influencia en
el tiempo de
fragua.-

Se expuso en el capítulo de fragua y endurecimiento, que existe una relación normal entre la relación a/c y el calor producido por la reacción de hidratación y cristalización de los componentes del aglomerante, estableciéndose que cuanto más alta es la temperatura de fraguado, más pronto este termina, y que cuando más agua esté presente en la mezcla menor es dicha temperatura.

En el proceso de fragua, los componentes del cemento se solubilizan en el agua presente hasta la saturación de esta; alcanzado este punto, sobrevienen ciclos periódicos de cristalización hasta que la formación de sólidos alcanza un volumen tal que aprisiona a las partículas aún no cristalizadas. Según investigaciones realizadas en el Instituto de la Construcción y del Cemento, de España, cuanto mayor sea el volumen físico de agua presente, mayor tiempo será necesario para alcanzar los puntos de saturación requeridos para el inicio de las cristalizaciones; respecto al calor específico desarrollado por el proceso, este será tanto menor cuanto mayor sea la cantidad de agua, debido a que será absorbido por esta; y por ser este calor responsable en gran parte de la velocidad del paso de los elementos hidratados a la fase sólida del proceso, cuanto menor sea, menos influirá en él, con el subsiguiente retardo.

El cuadro N°2 de la lámina si -

guiente, elaborado en el Instituto de la Construcción y del Cemento, hace apreciar la importancia de la relación a/c en el desarrollo de calor y en el tiempo de fragua. Los peraltes máximos de las curvas térmicas corresponden a los puntos de fin del fraguado, según la aguja de Vicat.

Influencia en la resistencia.-

El factor más importante que influye sobre la resistencia del hormigón, es la relación a/c, manifestándose sus efectos con más intensidad a edades tempranas.

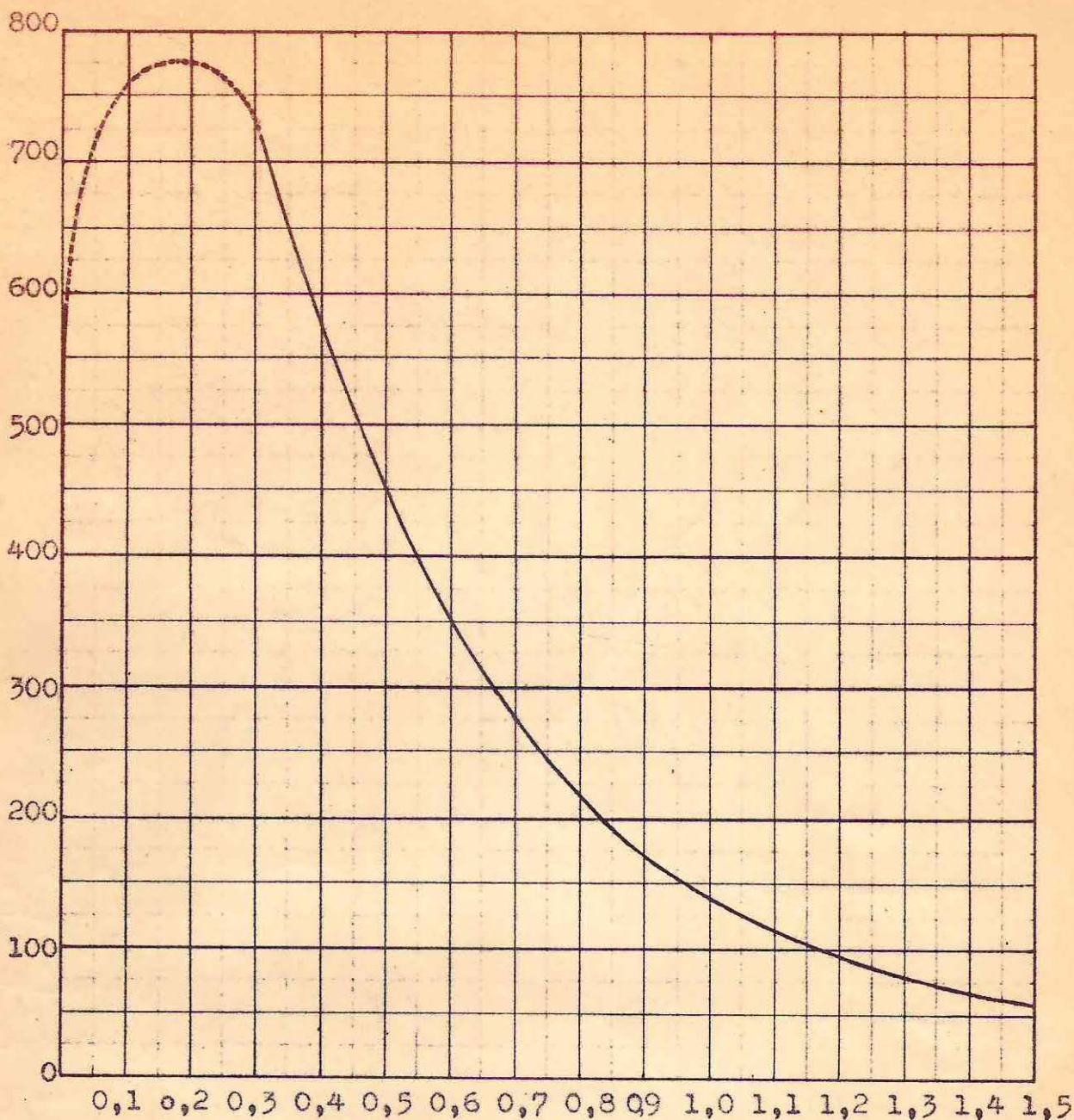
La resistencia del hormigón es proporcional a la relación H/C (H, huecos por unidad de volumen de hormigón; C, volumen absoluto de cemento por unidad de volumen de hormigón). La influencia de la relación a/c se evidencia por ser el agua del conglomerado no fijada en la reacción de la fragua la responsable casi absoluta de los huecos.

A un aumento de la relación a/c, las mezclas más ricas disminuyen más su resistencia que las más pobres; y estas últimas pueden aumentarla ligeramente cuando el contenido de cemento se mantiene constante.

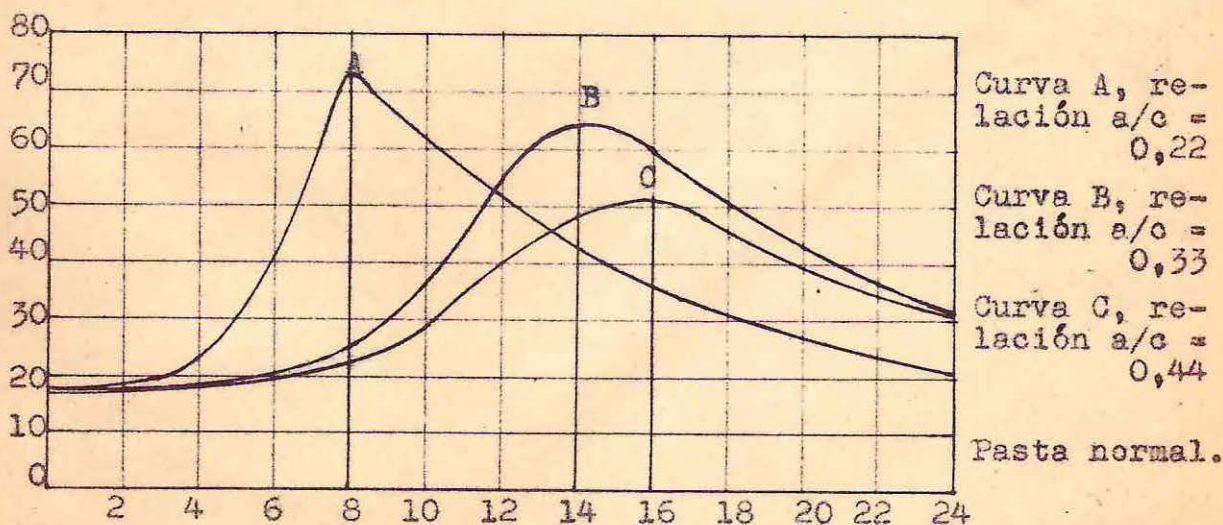
En la lámina siguiente se ha reproducido un gráfico de la influencia de la cantidad de agua de amasado en la resistencia de un hormigón ideal, a los 28 días.

Influencia en la duración.-

A menor cantidad de agua en la preparación de un hormigón fresco se obtiene una mayor compacidad del aglomerado, reduciéndose la exudación por el bajo porcen-



0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5
 eje de las x, relación a/c; eje de las y, resistencia a la compresión en kg/cm²; hormigón de granulometría óptima, según el BETON KALENDER.-



eje de las x, tiempo en horas; eje de las y, temperatura °C.
 Los puntos máximos de las curvas coinciden con el fin de la fragua. (Ing. Antonio López Franco,)

ta

taje de poros o capilares filiformes que causa el asentamiento de los sólidos en el medio acuoso. Este fenómeno influye en la conservación del hormigón ante los ataques metereológicos y físicos en general; la permeabilidad aumenta rápidamente para relaciones a/c mayores que 0,5 (ver cuadro^a de la lámina siguiente) por lo que su reducción aumenta apreciablemente la resistencia del hormigón al ataque de agentes químicos nocivos. Estos fenómenos se deben al aumento de estructura capilar del aglomerado en el primer caso, y a la reducción de ella en el segundo.

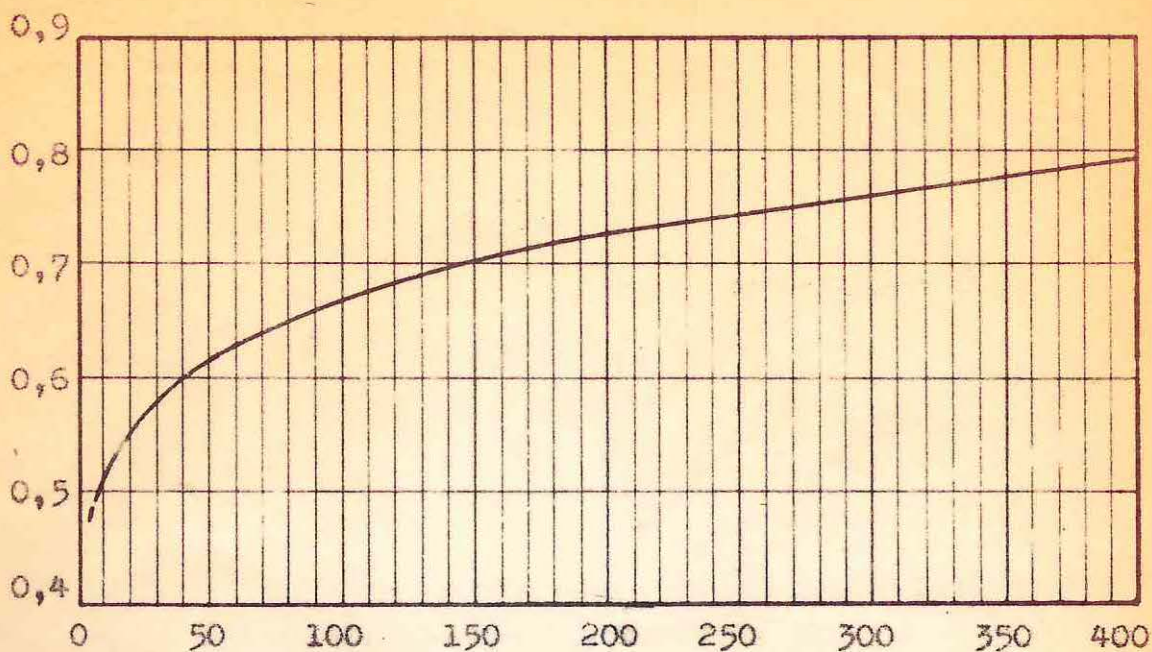
Influencia en la variación de volumen.-

La retracción del hormigón depende principalmente del contenido de agua unitario (ver cuadro b de la lámina siguiente). El contenido de cemento de una mezcla tiene muy poco efecto en la retracción, excepto en cuanto influye en las exigencias del agua, que ordinariamente son pequeñas.

Al existir en el conglomerado por la menor cantidad de agua, menor tensión superficial, los componentes sólidos durante el asentamiento y la compactación, sufren menores separaciones entre sí; esto se traduce en una mayor constancia del volumen del hormigón durante el proceso de solidificación y endurecimiento.

Influencia en la elasticidad.-

El módulo de elasticidad del hormigón es aproximadamente proporcional a la resistencia; por tanto el módulo de elasti-

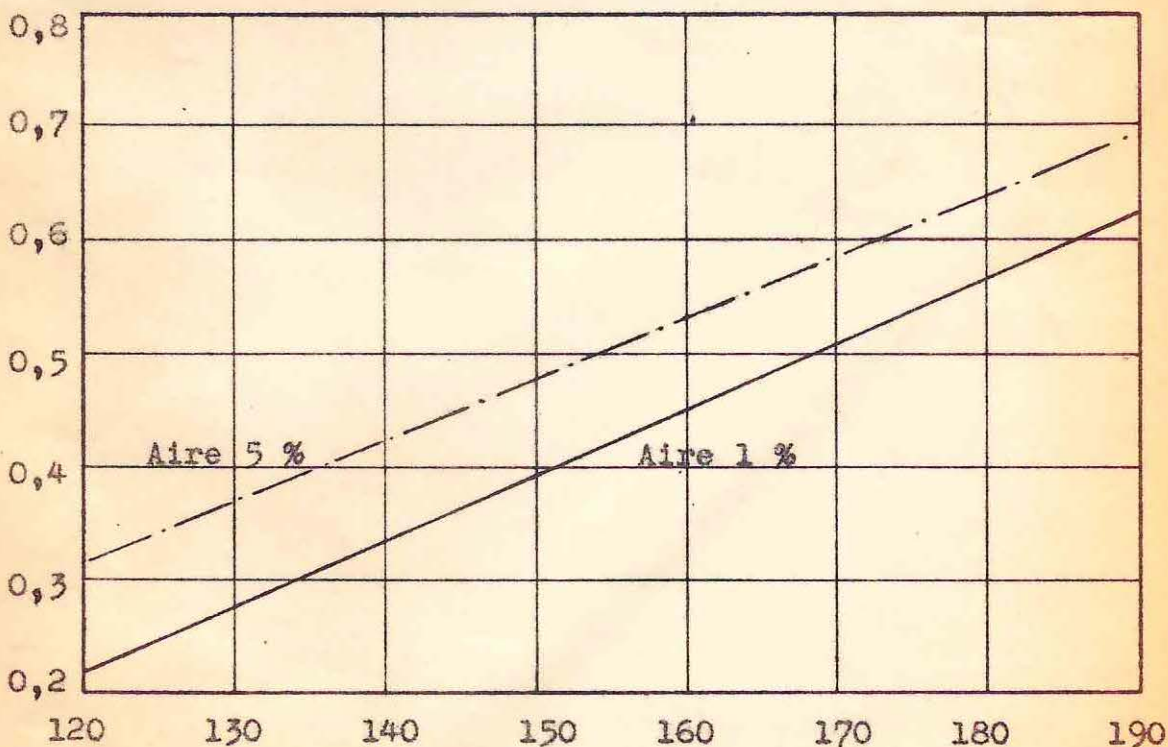


$x-x'$, coeficiente de permeabilidad con respecto al hormigón $K_c \times 10^{12}$

$y-y'$, relación agua cemento en peso.

(K_c es una medida relativa del flujo de agua a través del hormigón)

Influencia de la relación agua cemento en la impermeabilidad de un hormigón con árido máximo de 38 mm. (M.A.H.)



$x-x'$, litros de agua / m^3 .

$y-y'$, retracción en mm/m.

Influencia del contenido de agua y aire en hormigón, árido máximo 19 mm y asiento constante. (M. A. H.)

cidad varía inversamente a la relación a/c.

Influencia en
la conductivi-
dad.-

La conductividad térmica del hormigón varía inversamente al contenido de huecos debidos al agua, y directamente al contenido de cemento, y sólidos en general. Esto se debe a que el cemento y los sólidos confieren al hormigón su densidad específica, mientras que los poros del agua la disminuyen.

Influencia en
el peso espe-
cífico.-

El peso unitario del hormigón se reduce en proporción directa al contenido de agua. La razón se deduce de todos los fenómenos expuestos, sobre el aumento de porcentaje de huecos con el incremento de la relación a/c.

La compactación, la relación a/c y la resistencia Inicial.-

Es imposible, bajo los métodos usados convencionalmente, producir hormigón en el que todos los espacios entre las partículas de los áridos estén llenos de un medio sólido aglomerante, debido a que es necesario, para obtener mezclas dóciles, usar mucho más agua de amasado que la que hace falta para hidratar el cemento. Además, el volumen absoluto de los productos formados por la hidratación del cemento es menor que la suma de los volúmenes absolutos del cemento y del agua que intervienen en la reacción; y siendo esta de carácter químico es imposible que la pasta de cemento endurecida llene por completo el espacio originalmente ocupado por la pasta fresca. Por último también es imposible amasar y colocar hormigón sin que aprisione algo de aire, normalmente de 10 a 30 litros por m³.

Estructura interna del hormigón fresco.-

Inmediatamente después de la colocación definitiva del hormigón, los sólidos, incluso las partículas de cemento, están en desequilibrio por acción de la gravedad y se sedimentan impulsando el agua presente hacia arriba, estableciéndose cauces capilares que llegan hasta la superficie.

La primeras en estabilizarse son las piezas mayores de áridos, apoyándose unas sobre otras y formando un esqueleto estructural, dentro del cual continúa la sedimentación, en lo sucesivo del mortero. Por último entre los granos de arena, el cemento tiende a separarse de la mezcla (solamente con una relación a/c igual o menor que 0,3 se eliminaría la suspensión de sus partículas) y a dejar huecos de agua por encima del cemento sedimentado. Al final de esta etapa es evidente que el agua del hormigón amasado, ya no está homogéneamente distribuída en la mezcla, sino que llena: Primero, los espacios relativamente grandes bajo las partículas del árido; segundo, los pequeños intersticios entre las partículas de cemento sedimentadas; y tercero, una red de conductos filiformes comunicados entre sí. Esta apreciable falta de homogeneidad en su distribución en el efecto que más reduce la compacidad del hormigón.

Fenómenos en la estructura interna después de la solidificación inicial.-

Al hidratarse el cemento durante la etapa de endurecimiento posterior al fraguado, el desarrollo volumétrico de los geles al admitir cristalizaciones en su masa, reduce el tamaño de los huecos dejados por el agua no combinada, y por consiguiente aumenta grandemente la compacidad del hormigón. Por esta razón la cura prolongada y cuidadosa tiene gran influencia en la obtención de un hormigón compacto, resistente, e impermeable.

Agentes químicos
sobre la estruc-
tura interna du-
rante el fragua-
do.-

Existens sustancias químicas solubles que se forman a partir de compuestos presentes en el cemento y el agua de amasado que afectan la compacidad del hormigón.

Al combinarse el cemento con el agua se forma cal hidratada, que será tanto más agresiva cuanto mayor sea la cantidad de anhídrido carbónico que contenga. Las partículas de cal en el interior del conglomerado no ofrecen mayor resistencia mecánica, y su presencia para efectos de compacidad puede considerarse nula, pues la acción de deslavado producida por la humedad arrastra estas sales hacia la superficie, formándose huecos.

Otros agentes se combinan con el cemento para formar compuestos poco solubles que quebrantan el mortero y hormigón por el volumen que desarrollan. Las sustancias más perniciosas entre las que producen este tipo de ataque son algunas sales neutras como los sulfatos de sodio y magnesio, generalmente presentes en el agua, y de calcio, presente en el cemento, y algunos nitratos y cloruros.

Las soluciones de sulfatos reaccionan químicamente con la cal hidratada y con el aluminato cálcico hidratado de la pasta del cemento formándose hidrosulfato de Candler, que generalmente se presenta en forma pulverulenta y amorfa, no cristalina, sin ninguna resistencia mecánica. Estas reacciones van acompañadas

de fuerte dilatación y desprendimiento de calor, fenómeno que ocasiona el quebrantamiento del preparado.

Precauciones para
una buena com-
pacidad.-

De lo anterior se manifiestan como razones de buena compacidad del hormigón, evitar al máximo la formación de capilares y huecos debidos al agua, disminuyendo al límite el volumen que esta ocupa en la masa del hormigón sin actuar en la solidificación, y obtener, durante el endurecimiento inicial, la cimentación de las sales libres del cemento(sales , sulfatos, etc.) incorporándoles al entramado resistente del aglomerante, combinando tales sales con agentes químicos, que las transformen en compuestos insolubles de marcado valor mecánico.

CAPITULO IV

MÉTODOS DE ELEVACION DE LA RESISTENCIA INICIAL

La resistencia inicial de los aglomerantes puede aumentarse por medios físicos, reduciendo la relación agua/c , y aprovechando los beneficios a edades tempranas de la mayor compacidad obtenida; acelerando la velocidad de hidratación de las partículas del cemento , disminuyendo al máximo su tamaño, o sea incrementando su superficie específica; y aprovechando las propiedades físicas del calor como catalizador del fenómeno de fragua y endurecimiento, acelerándolo.

También puede aumentarse la resistencia inicial por medios químicos, agregando a la mezcla compuestos acelerantes del fraguado por catálisis;

aumentando la proporción de aluminatos o disminuyendo la de sulfatos en la composición de los cementos; y agregando a la mezcla agregados reactivos sobre los cales libres del cemento.

Métodos para la reducción de la relación a/c.-

Disminución de la tensión superficial del agua.-

La tensión superficial normal del agua impide la defloculación de los granos del cemento en las mezclas, evitando su distribución homogénea en el medio. Esto se supone debido a la falta de equilibrio entre las cargas eléctricas del agua y las partículas de cemento; las características de disolución coloidal de la mezcla, son pues, disminuidas por este fenómeno.

Cuando se logra establecer un equilibrio, las partículas de cemento adquieren cargas eléctricas del mismo signo y comienzan a repelerse unas a otras, deshaciéndose los flóculos o glómerulos y pasando el sistema al estado de dispersión homogénea, fundamental en una buena suspensión coloidal.

En esta forma las partículas de cemento se mojan íntegramente, y envuelven y se adhieren íntimamente a los agregados; además, las partículas libres contribuyen a la lubricación del preparado, mejorando considerablemente la trabajabilidad; esto se traduce en una apreciable rebaja en la cantidad de agua necesaria para el asentamiento deseado. (Los agregados utilizados para este efecto permiten disminuir $\frac{1}{4}$ la cantidad de agua de amasado de un 15 a 20% los convencionales, y hasta un 25 % los más modernos, a base de agentes sintéticos.

Las sustancias químicas activas en los primeros son a base de lignosulfonato de calcio, y en los segundos, a base de dispersores sintéticos. En ambos casos la dosificación no debe aumentar del 1 % en peso de cemento, pues una cantidad mayor retardaría el proceso de fraguado.

En el país se encuentran utilizados en escala comercial el Plas-timent, de Sika, que se agrega directamente a la mezcla; viene en polvo, que se solubiliza en el agua fácilmente. Su empleo retarda ligeramente el endurecimiento durante las primeras 60 horas, recuperándose después el ritmo normal del proceso; y se dispone también del Puozzolith, producto norteamericano, en el que el agente químico está apoyado en un excipiente puzolénico.

Importancia de
agentes sinté-
ticos en la re-
ducción de a/c.-

Se está iniciando en los Estados Unidos la aplicación de la sustancia sintética denominada carboximetilcelulosa, o CMC, a la técnica de los cementos. En el sistema agua-cemento-agregados, la CMC en dosis apropiadas no afecta las reacciones de fraguado, no reacciona ante los áridos, ni es afectada por el calor desarrollado ni por la alcalinidad del cemento; estos factores más bien mejoran su disolución en el agua y sus propiedades.

Característi-
cas de la CMC.-

Además de su fuerte acción dispersante y suspensora de partículas, presenta una característica de gran valor en la ejecución de hormigones, que es la trixotropía acentuada que comunica al preparado. Los hormigones y morteros la poseen en cierto grado; pero su incremento es notable ante la acción de la CMC.

trixotropía

? —

La trixotropía consiste en que una solución tenga una forma de alta fluidez libre cuando se la sacude o agita, y que se fije a una consistencia espesa solamente cuando está en reposo. Esto se debe a que la estructura gelatinosa que se desarrolla en una combinación de sólidos en un medio líquido, adquiere las características de este cuando es alterada por la vibración o sacudimiento. Este fenómeno es reversible.

Se evidencian las grandes ventajas que produce este fenómeno en la preparación de hormigones y morteros de muy baja relación a/c, para ^{los} que el efecto del vi-



brado se incrementa, reduciéndose aún más la cantidad de agua de amasado.

Vale hacer notar por último, que el fuerte efecto de dispersión que la CMC produce, evita el asentamiento mecánico de las partículas del cemento, en las capas inferiores del preparado, impidiendo que se produzca el empuje capilar del agua no fijada hacia las capas superiores de la mezcla; con esto se obtiene la distribución homogénea del agua en el conglomerado, evitándose el escurrimiento y garantizándose un buen efecto de curado para el endurecimiento de los geles.

*dispersión
homogénea*

Arrastre de aire.-

El aire es un ingrediente de los hormigones y morteros, que según su origen se clasifican en naturalmente arrastrados y artificialmente incorporados.

El primero es un accidente en la elaboración de un preparado, y no desempeña papel útil de ninguna especie, siendo convencionalmente considerado como un factor negativo en las características mecánicas del hormigón, por la disminución que produce en su peso específico y su compacidad. Las cantidades en que se le encuentra en los hormigones y morteros depende principalmente del tamaño máximo de los agregados, de las características de estos, de la forma de revoltura, de la cantidad y finura del cemento, temperatura del hormigón, y el asiento en el cono.

Los morteros arrastran de un 4 a 6 % en volumen; los hormigones entre el 0,5 y el 3 %, según disminuye el tamaño máximo de agregados y aumenta el volumen absoluto de la pasta.

El aire artificialmente incorporado se obtiene en los hormigones por medio de aditivos patentados, agregados en pequeñísimas cantidades, que producen la incorporación de pequeñas burbujas de aire dispersadas por toda la masa. Estas burbujas son esferoides incomunicadas entre sí, con diámetros que varían entre 1,25 y 0,08 mm., según el Bureau of Standards.

Los aditivos para este efecto más conocidos son: El Darex, la resina de Vinsol, y el Plastocret.

Darex.-

Es un sulfonato hidrocarburado de trietanolamina, fabricado por la Dewey

and Almy Chemical Company. Es soluble en agua, por lo que se incorpora directamente a la mezcla. Admite la inclusión de aire de un 3,5 a un 6 %, según la dosificación empleada. Normalmente para obtener un 4 % de aire incorporado, se emplea en una parte % del peso del cemento por m³.

Resina Vinsol.-

Constituída por una fracción insoluble en petróleo de un extracto hidrocarburado de madera de pino, con alquitrán de hulla, fabricado por la Hércules Powder Company. Se expende en polvo, que por ser insoluble en agua se mezcla previamente con hidróxido de sodio (soda cáustica) antes de ser agregada a la mezcla. Sus dosificaciones son las mismas que para el anterior, *¿cuales?*

Plastocret.-

Se presenta en polvo, que se mezcla en seco al preparado. Eleva el contenido de burbujas hasta en 3,5 %, empleándose en proporción de 1 % del peso del cemento por m³. Este producto es de patente alemana, y se fabrica y distribuye en Chile, por la firma Sika.

Porcentajes
recomendados
de aire in-
corporado.-

La cantidad de aire que generalmente se incorpora artificialmente a un hormigón, es por término medio, de un 4 % en volúmen (40 l/m³); pero las condiciones específicas que se requieran del preparado la hacen variar entre el 1 y el 6 %.

Como la mayor parte del aire incorporado está contenido en la mezcla de agua, cemento y arena, se deduce que el porcentaje de aire necesario en hormigón elaborado con áridos que tengan un tamaño

máximo pequeño - con gran contenido de mortero - es mayor que para hormigones en los que se emplean áridos grandes - con bajo contenido de mortero. - En general, el contenido de agua apetecible, después de colocado y vibrado el hormigón, es el siguiente, según normas norteamericanas:

ARIDO GRUESO	<u>% AIRE</u>
Máx. en mm.	
19	5 ± 1
38	4 ± 1
76	3,5 ± 1
152	3 ± 1

El laboratorio técnico de la fábrica Melón, recomienda los mismos porcentajes, pero con variaciones del 2 %.

Factores que influyen en la cantidad de aire.-

Estos son los mismos que afectan el arrastre accidental; Granulometría y forma del árido; cantidad de cemento y su finura; tiempo de amasado, asiento en el cono y temperatura del hormigón. El contenido de aire aumenta con el contenido y la finura del cemento, la temperatura del hormigón, y el tiempo de amasado.

Efectos del aire incorporado.-

El aire actúa evidentemente como un árido adicional, que debido a su flexibilidad lubrica la mezcla, mejorando grandemente la docilidad del hormigón. De aquí que sea posible y ventajoso reducir el contenido de arena de una mezcla en cantidad igual al volumen de aire arrastrado.

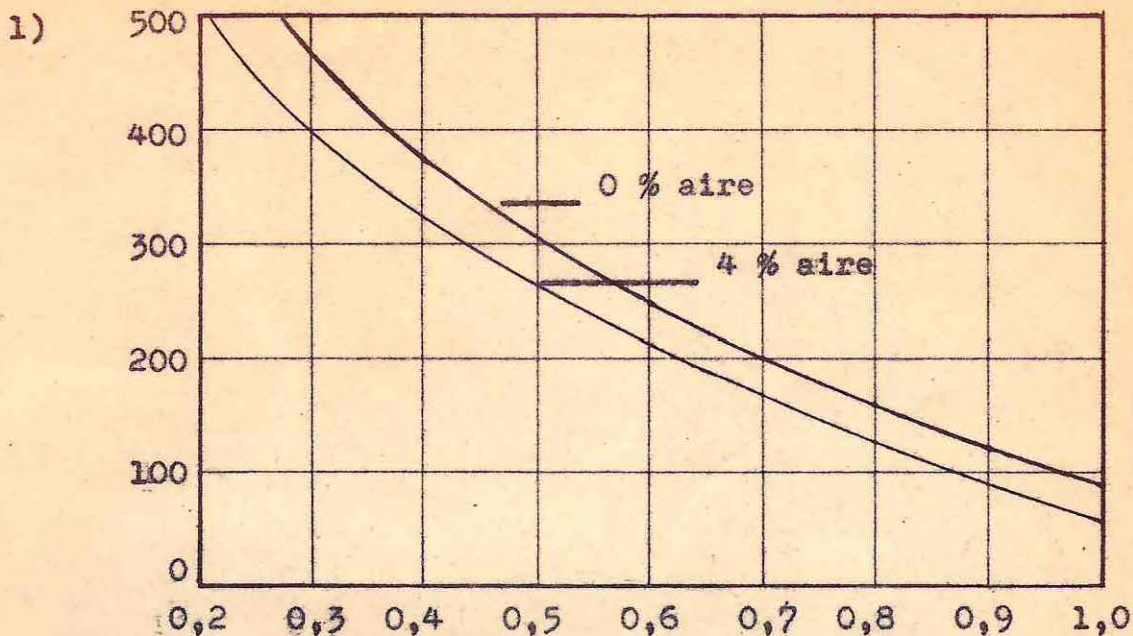
Por la alteración que produce en la estructura capilar del hormigón en reposo, reduce la exudación del agua y la separación de los ingredientes; por la mejora de docilidad que acarrea, facilita su colocación y manejo.

Lo que es más apreciable como característica de agregado, desde el punto de vista que nos ocupa, es que hace permisible, debido a sus efectos lubricantes, la reducción de agua de amasado en 2 a 4 % en volumen por cada tanto % de aire incorporado, siempre con mejoría en la docilidad y ninguna pérdida de asiento.

La relación
a/c y la in-
corporación
de aire.-

Establecido que el factor más importante en la resistencia del hormigón es la relación a/c, el arrastre de aire, por permitir su reducción, resulta beneficioso; pero, para una relación a/c determinada, la resistencia del hormigón se reduce de un 4 a 5 % por cada tanto % de aire incorporado; pero si el porcentaje de aire se mantiene constante, la resistencia del hormigón solo variará directamente con la relación a/c.

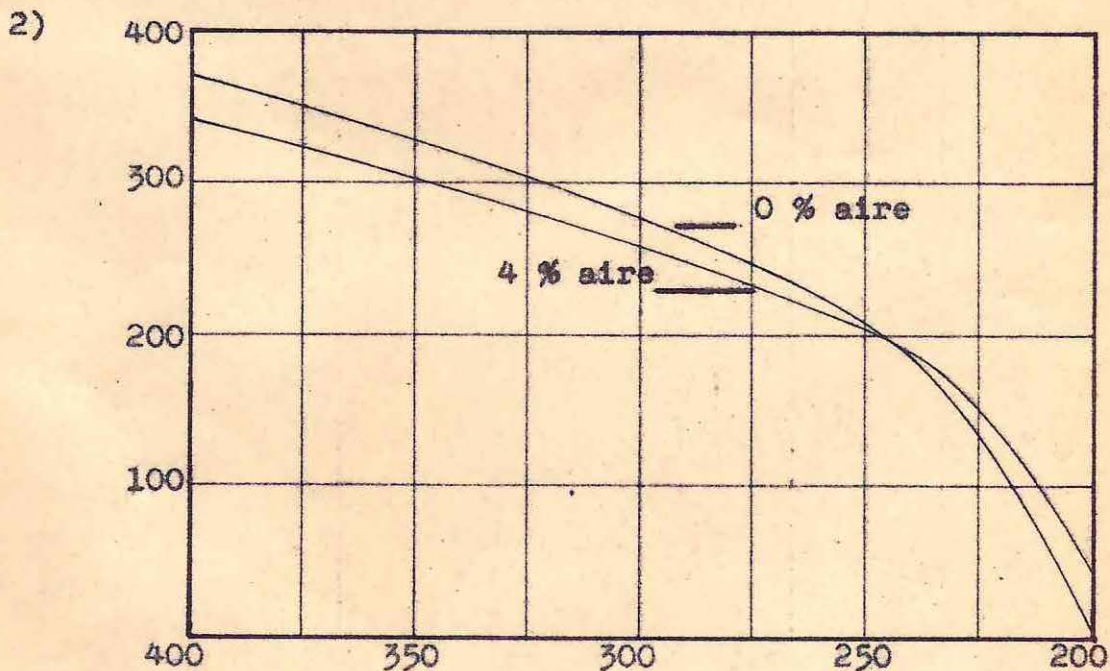
Como el aire incorporado permite emplear menos agua sin reducir el asiento, al conservar constante el contenido de cemento, la relación a/c podrá disminuirse lo suficiente como para que la reducción de resistencia resultante por el arrastre de aire, sea muy pequeña. (Ver gráficos a y b de la lámina siguiente.)



y-y', resistencia en Kg/cm².

x-x', relación a/c en peso.

Para a/c y asiento constantes cada tanto por ciento de aire reduce la resistencia del 4 al 6 %.



y-y', resistencia en kg/cm².

x-x', cemento cont. kg/m³.

Para contenido de cemento y asiento constantes, el arrastre de aire no produce pérdidas apreciables en la resistencia del hormigón.

COMPACTACION
MECANICA.-

El factor que impidió durante mucho tiempo el alcance de altas posibilidades en el manejo de un hormigón con baja relación a/c, fue la imposibilidad de trabajar la mezcla en óptimas condiciones de fluidez. Lo que se denominaba mezcla seca u hormigón seco (denominación que aún prevalece), no era posible moldearse bajo duras condiciones de trabajo, y sin ninguna seguridad en la obtención de una compactación favorable.

Sin embargo, al aplicarse a los aglomerados del cemento conceptos físicos específicos para los geles, se establece que el sistema agua-cemento - agregados en estado fresco posee muchas de sus características, entre ellas la trixotropía, que como se expuso en el capítulo referente a plastificadores, es la propiedad que tiene un sistema, de adquirir consistencia en reposo, y fluidez libre cuando se le golpea o sacude.

De aquí surge el uso de la aplicación de vibrado en la técnica del hormigón, que tiene como principal objeto su consolidación en estado fresco eliminando lo más posible los huecos en su interior debidos a un mal asentamiento y discontinuidad de su estructura, fenómenos que acontecen cuando el estado plástico del hormigón está determinado por una baja relación a/c.

Por este método se puede hacer fluir favorablemente hormigones con relaciones a/c comprendidas desde 0,5, que es la que limita, por término medio, la posibilidad de trabajabilidad para medios manuales, hasta 0,35, sin aditivos plastifi-

cantes o incorporadores de aire.

Industrialmente estas bajas relaciones a/c permitidas por el vibrado redundan en varios beneficios, tales como ahorro en cemento y reducción de los plazos de endurecimiento, con la siguiente ventaja de la pronta re-utilización de moldajes y encofrados.

Equipos de vibración.-

Los equipos de vibración de alta velocidad de que hoy se dispone, consolidan fácilmente hormigones que tengan un contenido de agua y un acento mucho menores que los exigidos cuando se emplean métodos de apisonamiento manual o vibradores de bajo rendimiento.

Los vibradores son de inmersión cuando se aplican directamente a la masa de hormigón, y sujetos a los encofrados cuando la operación anterior no puede ser efectuada. Los primeros son, el vibrador interno, de aguja, y la regla vibradora, que termina simultáneamente la superficie, y se utiliza en pavimentos; los segundos, la mesa vibradora, y el vibrador externo, que se acopla rígidamente a los moldajes.

En cualquiera de los casos, eléctricos o neumáticos los vibradores no deben funcionar a menos de 7.000 revoluciones por minuto, como condición de un buen rendimiento.

El vibrado por inmersión es en general más eficaz que el del encofrado. La cantidad de vibración requerida en un sitio o parte del hormigón moldeado, se aprecia por el movimiento de la superficie, la textura del hormigón y por la a-

proximación ~~del sonido~~ del sonido del vibrador a un tono constante. Hay que establecer un espaciamiento sistemático de los puntos de vibración, y mantener esta por el mismo tiempo en cada punto (para 7.000 revoluciones por minuto hasta de 5 a 10 segundos para vibrar 1 m² de superficie por 15 cm de profundidad). *fuentes?!*

El exceso de vibración es poco probable que acontezca cuando el asiento del hormigón es el mínimo posible para la colocación por este método (a veces de valor 0). Cuando tiene lugar tal exceso, el hormigón de la superficie aparece muy fluído, siendo en realidad una capa de mortero en el que prácticamente no aparece árido grueso. Siendo la regla esencial para una buena vibración el uso de la mínima cantidad de agua, al producirse las indicaciones anteriores, se recomienda reducir la relación a/c, y disminuir el asentamiento, y no el tiempo de vibrado.

Efectos del vibrado en las características y técnica del hormigón.-

La vibración aumenta el módulo de elasticidad de los hormigones, su resistencia a la compresión, su adherencia, su capacidad de duración. Al mejorar su compacidad, lo hace más impermeable, y por consiguientes más resistente contra los agentes nocivos físicos y químicos.

Por efectuarse más íntimamente la ligazón de la estructura pétreo, resulta una disminución de la cantidad

de mortero para rellenar los huecos entre las piedras, lo que arroja una economía de cemento que puede llegar hasta un 15 %.

Al disminuir la relación a/c, la vibración disminuye la contracción volumétrica de los hormigones, y los plazos de endurecimiento.

HORMIGÓN TRATADO AL VACÍO.-

El hormigón tratado al vacío se produce aplicando este a las superficies encofradas o sin encofrar de hormigón inmediatamente o muy poco después de haber sido colocado. Este tratamiento elimina el agua desde la superficie hasta una profundidad variable, y eliminando las burbujas de aire de la superficie, con lo cual da a este un aspecto de impecable terminación en cuanto a textura y resistencia, imposible de obtener por otros medios.

La extracción del agua hasta una profundidad considerable es posible debido a su continuidad en el hormigón fresco. Las burbujas de aire que son discontinuas, son retiradas de la superficie, pero no del interior del hormigón. La profundidad de extracción de agua y la cantidad retirada de la misma, depende del grosor de la mezcla, de sus proporciones, del número de superficie a las que se aplique el tratamiento, y de la presión por cm² con que se produzca el vacío.

El contenido de agua puede reducirse hasta una profundidad de 15 a 30 cms, y en cantidades de hasta un tercio del agua de amasado. Lo corriente es la elimina-

nación de una media del 20 % del agua en una profundidad de 15 cms.

Resultados.-

Esta acentuada reducción en el contenido de agua produce mayor resistencia y más capacidad de duración. La resistencia a los tres días de un hormigón tratado al vacío con respecto a un testigo es de 125 kilos por cm² contra 55 kg por cm².

Esta alta resistencia inicial obtenida tiene gran ventaja en las obras de hormigón moldeado, por el pronto retiro del desencofrado, reduciéndose así el capital invertido en ese equipo.

El estado final de las superficies de hormigón tratado es otra de las ventajas que ofrece este sistema. Se eliminan para efectos de apariencia faenas de recubrimiento rasante. En casos de presas, como la de Shasta y Angostura, se suprimió por completo la capa usual de mezcla más rica con que se recubren usualmente los paramentos de escurrimiento.

Su uso ha dado lugar a una transformación en la técnica del hormigón, sobre todo en países de alta industrialización como la URSS y los Estados Unidos. En el primero, tiene gran valor en los programas masivos de edificación de viviendas. En los Estados Unidos, la Ibec Housing Corp. ha construido y entregado la obra gruesa de viviendas en 24 horas, racionalizando la pre-fabricación de sus elementos en la misma obra. Se aplica también ^{en} el moldaje de tubos de hormigón de gran diámetro, los cuales, además de resultar sin defectos tanto interior como exteriormente alcanzan rápidamente su endurecimiento, pudiendo retirarse los moldajes una hora después del

vaciados.

En la pavimentación de un trecho de la Avenida Macul, por medio del vacío se redujo la relación a/c de 0,5 a 0,3 para una capa de 8 cm de espesor. Esta obra fue entregada al tránsito pesado 12 horas después de ejecutada, sin ningún deterioro.

La patente en país la explota la firma Neut Letour, que la ha usado con éxito en varias obras. El retiro de moldajes de la obra gruesa y su sometimiento a cargas, fue realizado por término medio en un plazo de 7 días después de concretada.

El sistema.-

El vacío se aplica a la superficie del hormigón conectando la manguera que lo aduce, a unas esteras de vacío o paneles de encofrado especiales. Las esteras para superficies sin encofrar son generalmente de madera contrachapada reforzada e impermeabilizada, revestida con dos capas de malla metálica cubierta con tejidos filtrantes. Para superficies curvas se usa en vez de madera acero flexible o articulado para adaptarse a la forma.

El perímetro de cada estera o área de vacío servido por una boquilla se cierra herméticamente, para evitar pérdidas de succión, por medio de una tira de tela metálica calafateada, recubierta por otra de tejido engomado de una pulgada de ancho, unida al perímetro de las esteras. Las áreas de estas suelen ser de 1 a 1,5 m², y pueden emplearse de varias formas.

Los encofrados de vacío individuales varían sus dimensiones según lo requerido, pero su espesor, debido a su ca -

rácter resistente varía de unos 3 a 5 cms.

Procedimiento
de aplicación.-

Las bombas de vacío deben comenzar a aspirar lo más pronto posible, mientras está aún fresco el hormigón. Si el inicio de fraguado se presenta antes de iniciarse la succión, no se obtendrá ningún beneficio; sin embargo, debe precaverse, tanto por la revoltura, como por un plazo de 20 a 30 minutos después de preparada la mezcla, la humectación homogénea del aglomerante; este tiempo se absorbe en las obras durante el manejo y colocación del hormigón, por lo que no acarrea ningún retraso de faena.

Es fundamental para un buen resultado del tratamiento, vibrar el hormigón encofrado unos pocos minutos durante el inicio de la aplicación; haciéndolo así, las pequeñas aberturas y canalillos formados por al absorber el agua, son llenados de inmediato con material macizo, tan rápidamente como se forman. Sin embargo, hay que procurar equilibrar debidamente la duración e intensidad de la vibración y la presión del vacío; un período de vibración demasiado débil o breve puede no cerrar por completo todos los huecos recientes, dejados por la extracción del agua, en hormigón que adquiere rápidamente rigidez, debido a la aplicación de un vacío intenso; y este sobretodo al principio puede desarrollar la rigidez del hormigón con rapidez excesiva para una vibración eficaz.

Las mezclas pegajosas con exceso de granos finos o con cementos de gran su-

perficie específica, no responden bien al tratamiento, debido a la fuerte fijación que producen del agua; conviene trabajar por esta misma razón con reducidos contenidos de cemento, con arenas gruesas, porcentaje mínimo de ellas, y temperaturas no muy altas.

CURADO AL
VAPOR .-

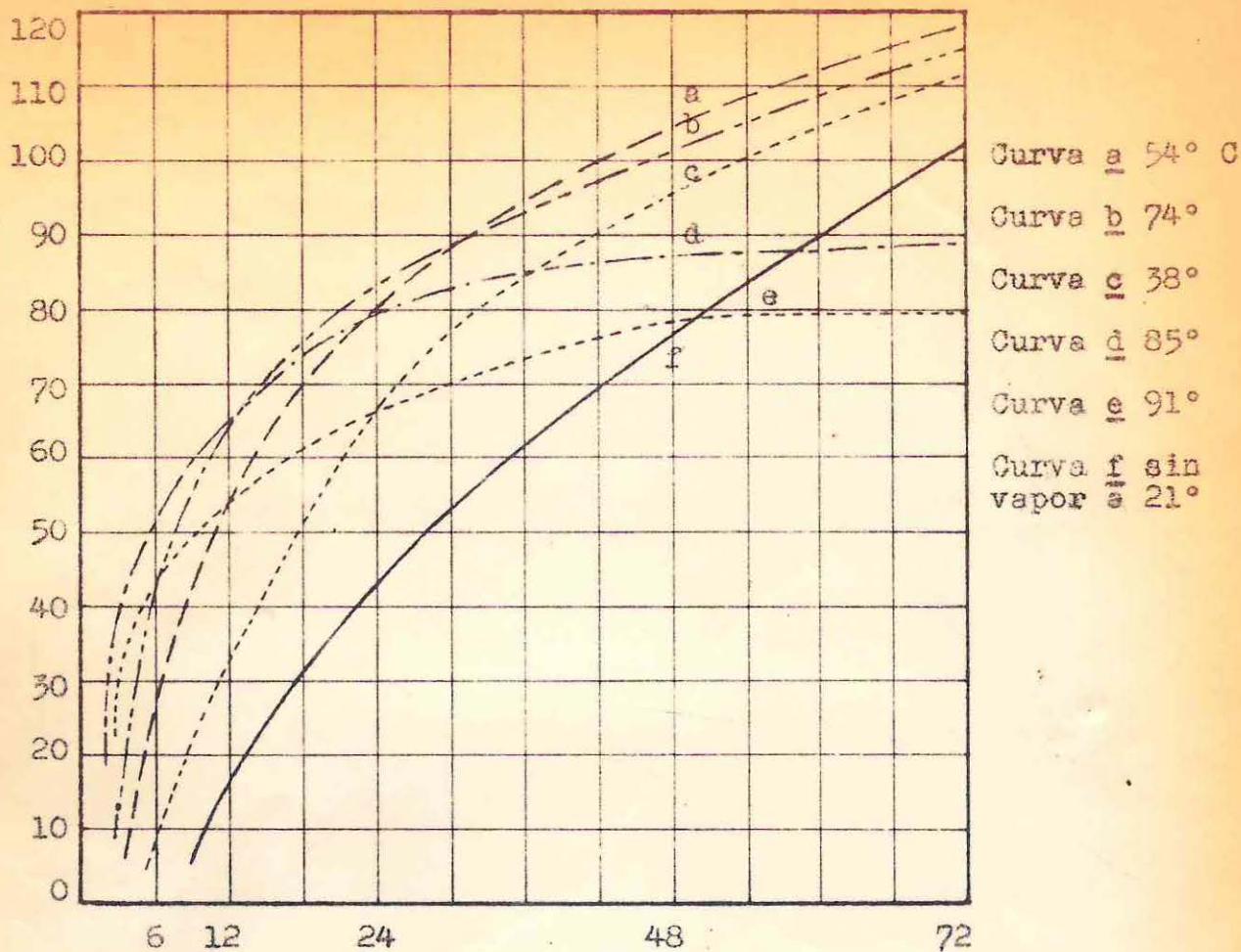
El sistema de curado al vapor consiste en someter el hormigón moldeado a un medio saturado de humedad a temperaturas superiores a la ambiental, a la presión atmosférica normal o superiores a ella.

De ser efectuado a la presión normal se denomina curado al baño turco, y de realizarse a presión superior, curado al autoclave. Esta última es superior en sus resultados sobre la rapidez de endurecimiento y el valor de las resistencias obtenidas, que además se mantienen para todas las edades del hormigón.

Los beneficios que implica el curado al vapor en la pre-fabricación de piezas de hormigón, se manifiesta además de la elevada calidad del producto obtenido, en un gran aumento de producción con una inversión baja, puesto que los moldes pueden usarse muchas veces en el mismo tiempo que con curado normal solo es posible hacerlo una vez.

Efecto de la
temperatura.-

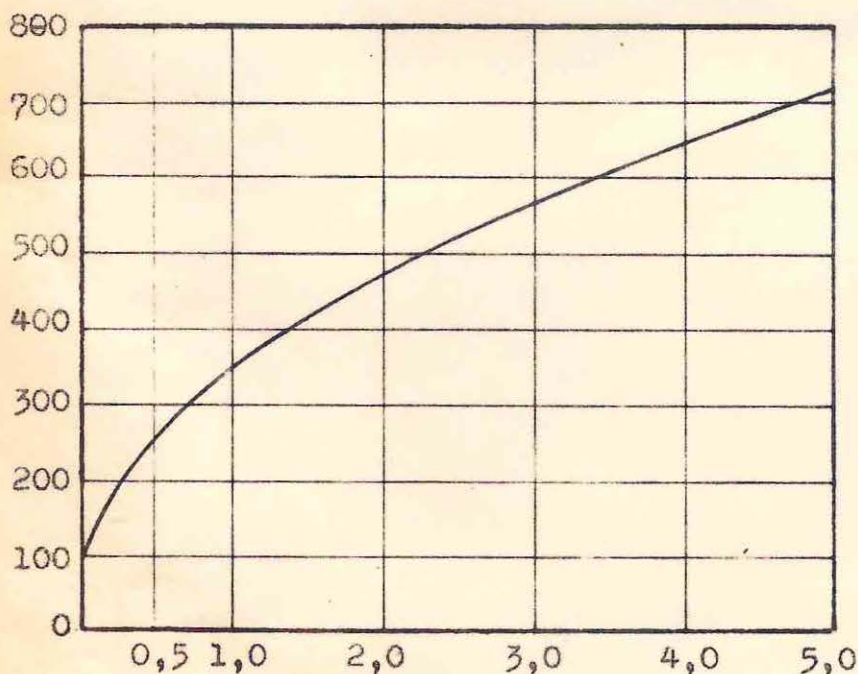
La máxima aceleración del endurecimiento, y las mínimas pérdidas en la resistencia a cualquier edad, se obtienen, con o sin presión, a temperaturas comprendidas entre los 55 y 75 °C. En el cuadro a de la lámina siguiente, se pueden observar que temperaturas mayores acarrear un descenso en las resistencias finales (72 horas), mientras que las inferiores no producen un aumento apreciable.



$x-x'$, tiempo en horas.

$y-y'$, tanto por ciento de la resistencia a los tres días de probetas en cura húmeda a 21°C, de hormigón de 300 kg c/m³, a/c 0,55, y árido máximo de 38 mm. - (100 % = 140 kg/cm²)

Efecto de cura al vapor a diversas temperaturas, en las resistencias iniciales. (M. A. H.)



Influencia de la presión en curado al vapor a temperatura constante.- (M. A. H.)

$x-x'$, presión en exceso sobre la atmosférica, en kg/cm².-

$y-y'$, resistencia en tanto por ciento de la obtenida a 48 horas con curado normal a 20°C

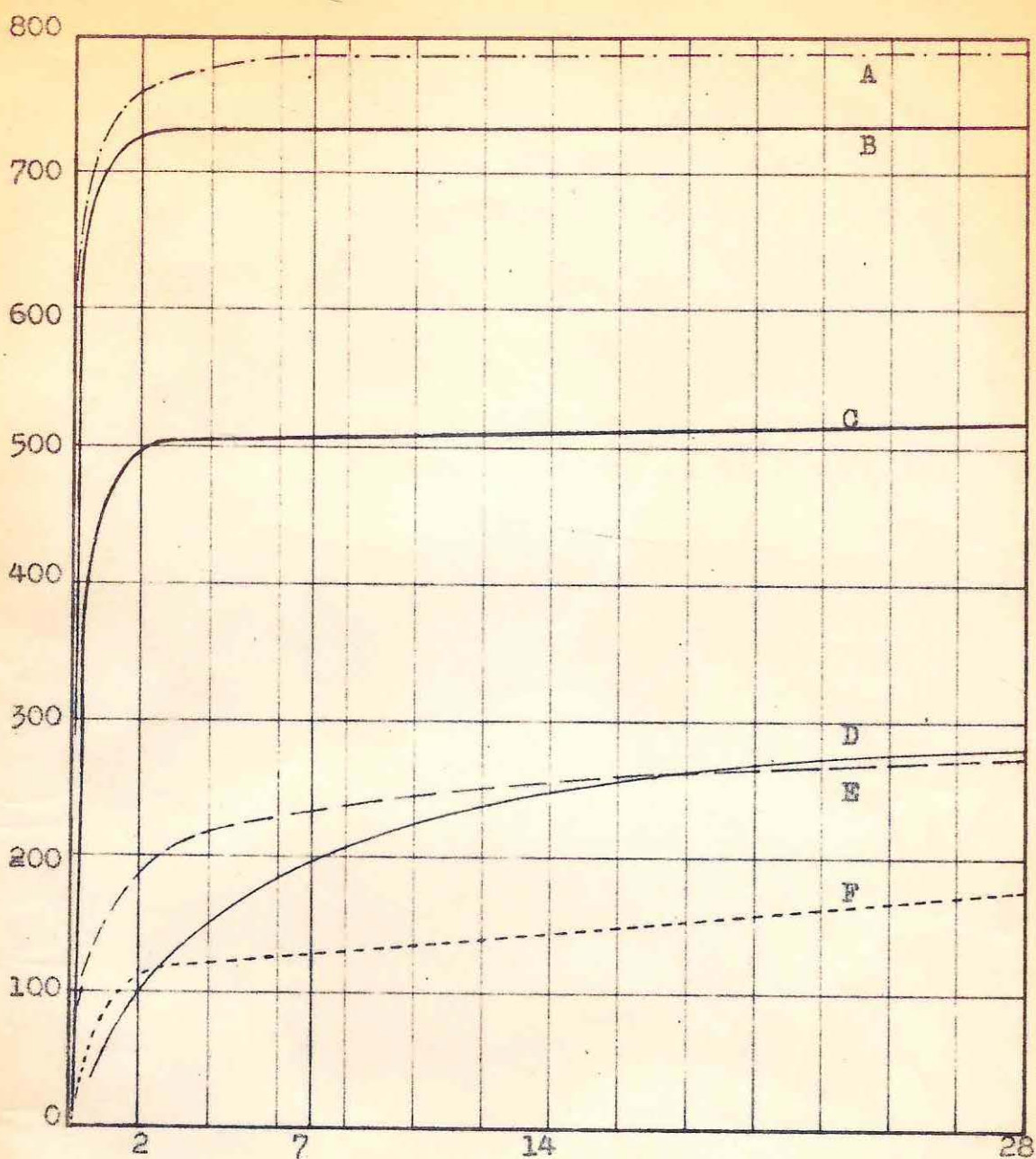
El papel del calor en el curado, además de responsabilizarse por la formación del ambiente húmedo, es producir una catálisis del proceso de fragua y endurecimiento; de allí que sea necesario prever en la mezcla un plazo de estabilidad para que el proceso no sufra alteraciones por efectos mecánicos, de 2 a 6 horas, antes del inicio del curado. A mayores temperaturas bajo las que este se realiza, mayor deberá ser el retraso; así se logrará una resistencia a las 24 horas mayor que la que se obtendría si el curado comenzase inmediatamente después de llenar los encofrados.

Influencia de la presión.-

Las resistencias obtenidas por el curado al autoclave son directamente proporcionales a las presiones aplicadas (ver cuadro b de la lámina anterior); esto se debe^a que cuanto mayor sea la presión, más constante será el contenido de agua para la absorción química que se produzca en el interior de la masa, en las etapas de cristalización y endurecimiento de los geles.

Influencia del tiempo de curado.-

La duración del proceso de curado depende de la temperatura que se realice, y los resultados de resistencia que se deseen. En el cuadro de la lámina siguiente puede observarse que un plazo demasiado corto, si bien produce alguna aceleración en el endurecimiento, llega a disminuir las resistencias obtenidas a las edades finales; esto se produce debido a que por el pronto



$x-x'$, tiempo en días.

$y-y'$, resistencia para las edades que se indican, en tanto por ciento de la que se alcanza a dos días con curado normal a 20° C.

Curva A 48 h.

Curva B 24 h.

Curva C 12 h.

Curva D 0 h.

Curva E 6 h.

Curva F 3hh.

Influencia del tiempo de permanencia del hormigón en cura a vapor, a presión y temperatura constantes. (M. C. M.)

retiro del preparado, la fragua no alcanza a realizarse en su totalidad, y por el calor absorbido, el preparado pierde agua por evaporación, produciéndose un curado casi seco; además, se observa en este cuadro, que pasado cierto límite de permanencia, los resultados obtenidos no justifican la larga duración del proceso. Concretando, se evidencia que no producirá mayor beneficio técnico, y a veces lo reducirá, una aplicación menor de 6 horas, ni se incrementarán favorablemente los obtenidos, más allá de un plazo de 24 horas. Los mejores resultados se observan pues, circunscritos por un margen de entre 12 horas como mínimo y 24 horas como máximo.

AUMENTO DE LA
SUPERFICIE ES-
PECÍFICA DEL
CEMENTO .-

El aumento de la finura de las partículas de un aglomerante, incrementa su velocidad de hidratación, produciendo consecuentemente mayor resistencia inicial y más rápida generación de calor.

Aunque esta última en su totalidad, y la resistencia en las últimas edades son algo mayores para los cementos más finos, los efectos de la mayor finura se manifiestan principalmente durante el primer período de la hidratación.

Definición de
superficie es-
pecífica.-

Se llama superficie específica del cemento, y en general, de todos los cuerpos pulverulentos cuya finura de grano no puede ser determinada por los medios convencionales de tamizado, al área total en cm^2 de la superficie de todas las partículas, supuestas esféricas, contenidas en el gramo.

Los límites de la superficie específica del cemento aceptados para su operación normal, van de 1600 a 2000 cm^2 .

Efectos de la
superficie es-
pecífica en la
técnica y ca-
racterísticas
del hormigón.-

El empleo de cementos que tengan una superficie específica menor que 1600 produce una disminución en la docilidad del hormigón, y un exceso de exudación (el agua fluye fuera de la masa debido a la sedimentación rápida de los sólidos antes del fraguado inicial). En

estas condiciones el agua moja poco las partículas de cemento debido a que la superficie de contacto entre ellas y el cemento en volumen absoluto, es poca debido al relativo gran tamaño de las partículas.

De lo anterior se deduce que la cantidad de agua de amasado necesaria, es tanto menor cuanto mayor sea la superficie específica de los cementos; en los cementos normales, la superficie específica no es un valor absoluto por cuanto en la molienda del klinker la finura del grano no será homogénea. Siendo el agua presente en el proceso capaz de cubrir toda la superficie específica del aglomerante, su capacidad de hidratar sus partículas será tanto mayor cuanto menor sea el tamaño del grano.

La mayor finura mejora además la resistencia, la impermeabilidad y el aspecto del hormigón. Mejora también la docilidad, puesto que las finísimas partículas de cemento suavizan el roce entre los áridos; esta es una razón más, por la que se puede obtener una favorable reducción en la relación a/c.

Elevación de la resistencia inicial por medios químicos.-

AGREGADOS

ACELERADORES

DE FRAGUA.-

Los aceleradores son sustancias que hacen más rápido el proceso de fraguado y endurecimiento, actuando como catalizadores de la reacción de hidratación y cristalización de los componentes anhidros del cemento.

Los productos comerciales que se conocen en el país son a base de cloruro de calcio y agentes estabilizantes necesarios para evitar en lo posible el aumento de la reacción alcalina del cemento sobre los áridos reactivos.

La aplicación del cloruro de calcio fue iniciada por Kaspar Winkler en 1910, dando origen a la firma Sika.

Esta presenta actualmente dos productos aceleradores, que se diferencian químicamente por el grado de concentración del cloruro de calcio en ellos; son: Sika 2, de frague ultra rápido, líquido color rojo, recomendado para emergencias en las que se necesite un fraguado casi instantáneo del cemento; y Sika 3, líquido de color verde, para hormigones y morteros, de frague controlable según la concentración en el agua de amasado.

Tiempos de
fraguado.-

Para cementos Portland normales de buena calidad, y temperaturas ambiente y del agua favorables, Sika propone el siguiente cuadro, con indicaciones aproximadas :

Hormigón normal de 340 kg/m³ y 170 litros de agua

1 : 3 - 43	1 Sika 3 x 127	1 agua	endurece en 2 h.
1 : 4 - 34	1 Sika 3 x 136	1 agua	endurece en 4 h.
1 : 5 - 28	1 Sika 3 x 142	1 agua	endurece en 5 h.
1 : 7 - 21	1 Sika 3 x 149	1 agua	endurece en 6 h.

La Sika 3 empleada en dosis 1 : 3 con el agua de amasado dá al hormigón en 24 horas la resistencia a la compresión correspondiente a los 8 días; empleada 1 : 7 dá al hormigón la misma en 48 horas. Cumplidas favorablemente las condiciones para un hormigón de 340 kilos por m³, es posible desmoldar a los 8 días, obtenida entonces la resistencia del preparado a los 28.

Cloruro de
calcio puro.-

Para casos de desencofrado rápidos o pronto uso de las características mecánicas del preparado, el cloruro de calcio se disuelve en el agua de amasado en cantidades no mayores del 2 % en peso de cemento. Presenta la ventaja sobre los productos comerciales de un menor costo; sin embargo su empleo impone precauciones especiales, guardadas en las disoluciones expandidas en el comercio, para impedir retrasos en el manejo y colocación del hormigón, porque acelera también la pérdida de asiento y el desarrollo de su rigidez, por la dificultad de un control absoluto del plazo de fragua-

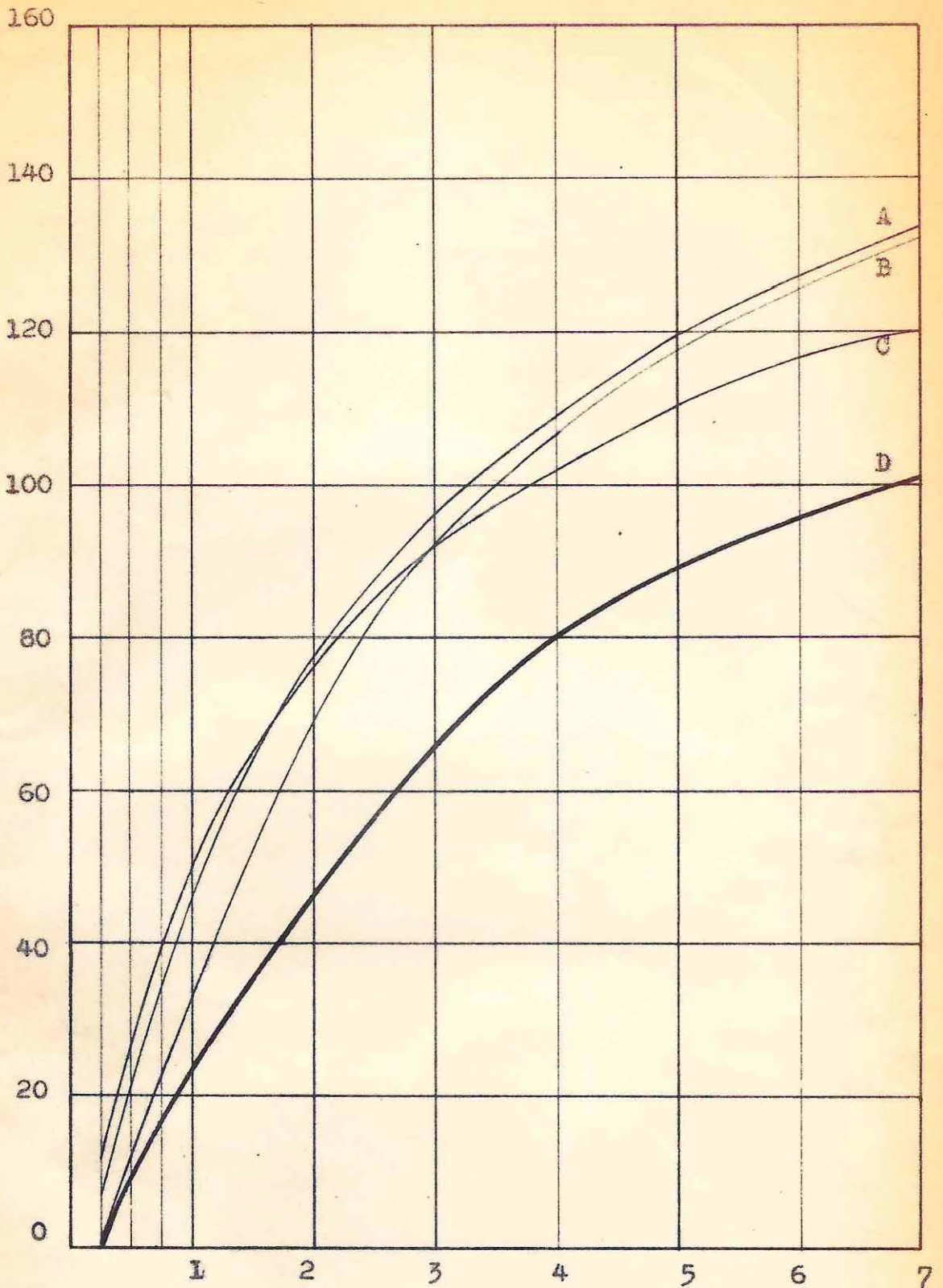
do. Se recomienda no utilizarlo sino hasta haberlo ensayado debidamente para cada componente del hormigón que se pretenda preparar; incluso la calidad y composición del cemento, por pequeñas que sean las variaciones, producen errores graves por la cantidad de cloruro cálcico que se añade a la mezcla.

La adición de cloruro de calcio produce en el proceso de fraguado cambios no bien conocidos hasta ahora en las complejas reacciones químicas, que se pueden considerar perjudiciales; sin embargo, usándose sin pasar los límites establecidos, estas alteraciones no significan valores apreciables en las cualidades generales del hormigón.

Su uso debe exceptuarse con cementos de alta alcalinidad, como los de alto horno, por el aumento ya indicado de la reacción sobre los áridos.

Es muy conveniente su uso en proporción del 1 % en peso de cemento por m³ de hormigón elaborado, para asegurar el desarrollo de fuertes resistencias iniciales que protejan al hormigón de la congelación a que puede quedar expuesto debido a bajas temperaturas.

En el cuadro de la lámina siguiente, se exponen los efectos en las resistencias iniciales de distintas dosificaciones de cloruro de calcio, apreciándose por la curva C, la disminución en la resistencia acarregada por una dosificación superior al 2 %.



eje x-x', tiempo en días.
 eje y-y', tanto % de resistencia
 a los 7 días de probetas
 sin C12 Ca.

Curva A, 2 %.
 Curva B, 1 %.
 Curva C, 3 %.
 Curva D, 0 %.

Efectos del C12Ca en las resistencias iniciales de mortero de 290 kg/m³, según el MANUAL AMERICANO DEL HORMIGON. (100 % = 165 kg/cm²)

EFEECTO DE LA
COMPOSICION
QUIMICA DE
LOS CEMENTOS
EN LA FRAGUA.-

Los materiales aglomerantes se suponen compuestos de dos partes esenciales: una básica, la CaO que constituye las cales ordinarias, y la otra neutra, los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio, que forman por sí solos los cementos.

El cemento Portland puede considerarse como formado por cuatro sustancias principales y cuatro secundarias, según el porcentaje en volumen con que se presentan.

Las primeras son:

C3S.....silicato tricálcico.....	3CaOxSiO2
C2S.....silicato bicálcico	2CaOxSiO2
C3A.....aluminato tricálcico.....	3CaOxAl2O3
C4AF...aluminoferrito tetracalcico.....	4CaOAl2O3Fe2O3

y las segundas:

C.....Óxido de calcio libre.....	CaO
M.....Óxido de magnesio.....	MgO
Y.....sulfato de calcio hidrat.....	CaSO4+2H2O
N2O...álcali.....	K2O+1,5Na2O

Las sustancias mayoritarias son el C3S y el C2S, responsables de la resistencia. En conjunto constituyen el 70 al 80 % del cemento Portland.

Supercementos.-

Con las mismas materias primas, y pequeñas variaciones en las dosificaciones de los componentes de los Portlands, y con un perfeccionamiento en los procesos de fabricación, se ha logrado la obtención

de cementos de alta resistencia inicial, y de las resistencias finales superiores al Portland común.

La característica de los supercementos consiste químicamente en la mayor cantidad de Si_2xCaO_3 en desmedro del Si_2xCaO_2 en la composición mayoritaria del cemento; además, se aumenta ligeramente el porcentaje de aluminato tricálcico, que si bien tiene muy pocas propiedades hidráulicas, aumenta por catálisis la rapidez de fraguado.

Durante la calcinación, el klinker se somete a temperaturas más elevadas que para el Portland; el enfriamiento debe producirse lentamente al principio, para que las cristalizaciones puedan ser del mayor tamaño posible y evitar así formación de cristales que por su pequeñez serían inertes a la hidratación; posteriormente el enfriamiento se acentúa para acción del temple del klinker.

La molienda de este debe efectuarse hasta que el residuo através del tamiz de 4900 mallas por cm^2 no pase del 1 al 2 % (el Portland corriente deja un residuo del 16 % en la misma malla) obteniéndose así una gran superficie específica, factor que como ya se expuso, acelera la hidratación de las partículas.

Cementos aluminosos.-

En el proceso de calcinación en la fabricación del cemento, la alúmina Al_2O_3 desempeña el papel de fundente; los aluminatos de calcio formados durante el proceso ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{CaO}_3$) tienen pocas probabilidades hidráulicas, pero influyen en la rapidez del fraguado. Por esta razón, con-

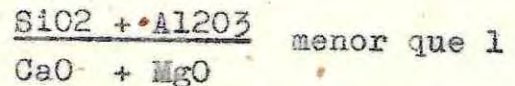
vencionalmente se le ha atribuido un papel negativo en la composición del cemento al producir gran desarrollo de calor, limitándose a un mínimo su presencia en el Portland.

Esta razón se mantiene valedera para los cementos comunes; pero en un nuevo tipo, aún no normalizado en países en los que la técnica del cemento está más avanzada, la cantidad de Al_2O_3 en el clínker llega al 40 %. Por tal razón este tipo de cemento es conocido como cemento aluminoso.

Se fabrica calcinando a temperaturas mayores que para el Portland, una mezcla íntima de $CaCO_3$ y bauxita (mineral de aluminio con 68 % de Al_2O_3). El producto sale del horno en estado líquido, por lo que a este cemento se le llama también cemento fundido.

Sus propiedades son las siguientes:

1°.- Inalterabilidad química, que se explica por un principio de Vicat que dice que si se pudiera fabricar un cemento en el que se cumpliera



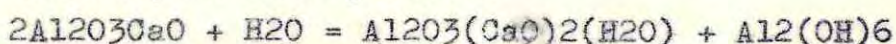
este cemento sería indescomponible, por la considerable cantidad de Al_2O_3 , con lo que se consigue la formación de Al_2O_3CaO , inatacable a la acción de aguas salinas, selenitosas o ácidas, en lugar del $Al_2O_3CaO_3$ que entra en el Portland, y que es totalmente inestable.

2°.- Alta resistencia inicial, o sea rápido endurecimiento, que no debe confundirse con rapidez de fraguado; a las

24 horas alcanza resistencias de 400 kilos por cm², contra menos de 100 kg/cm² alcanzan los Portlands de buena calidad en el mismo plazo. A los 3 días alcanza el 90% de su resistencia a los 28.

Composición.-

Los soportes principales de la resistencia de los cementos aluminosos son el SiO₂CaO₂, silicato bicálcico y el Al₂O₃CaO, aluminato cálcico. El primero es un componente que si pasa de cierto límite perjudica el material, y su papel es el de producir los geles; como puede observarse en la lámina siguiente, su acción se manifiesta en el pequeño peralte producido desde las 72 horas hasta los 28 días (~~en~~ en endurecimiento casi inapreciable). El se -- gundo es el elemento activo del fraguado y responsable del rápido endurecimiento inicial. Su reacción estudiada por Lafume, en el Bureau d'Organization Economique, de Francia, es la siguiente:

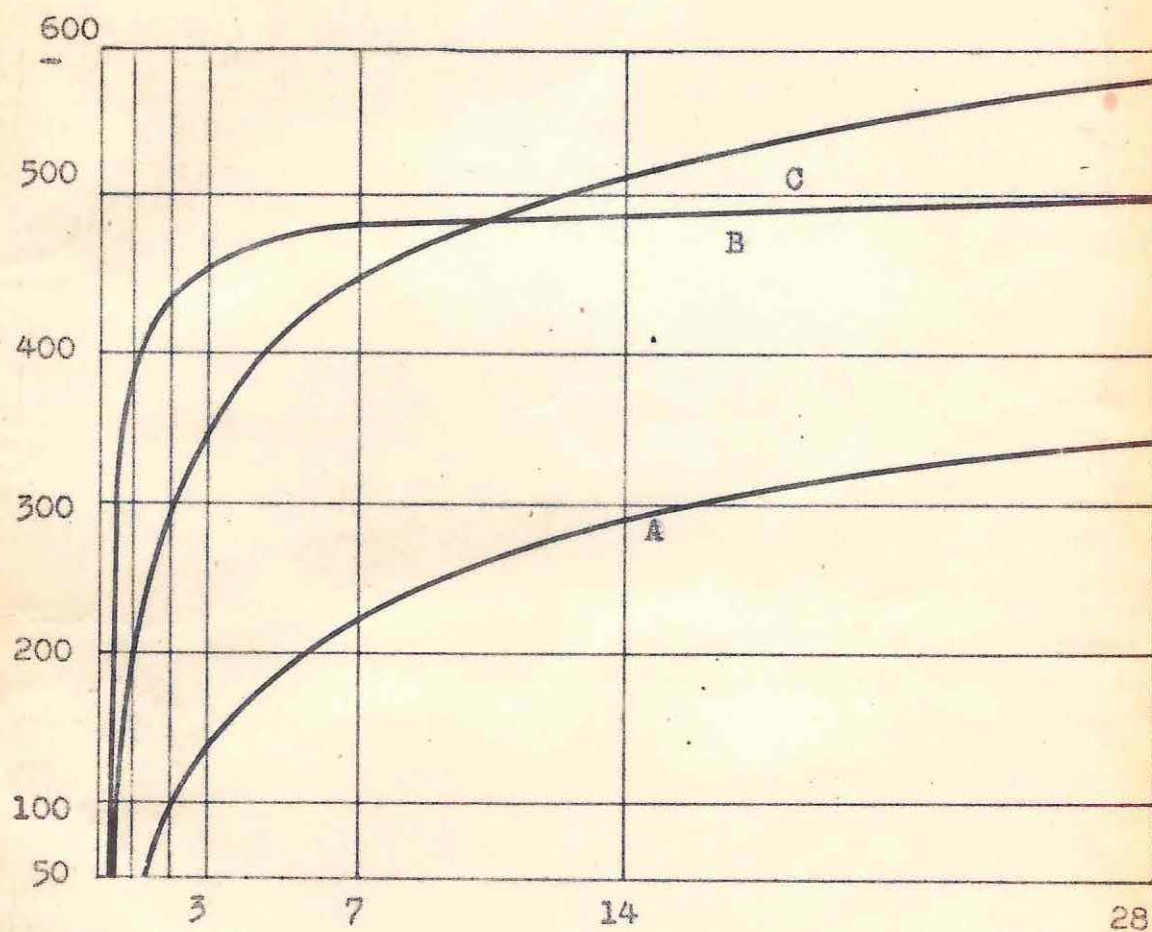


Esta reacción es ácida, y no ejerce acción ninguna con el SO₄Ca, sales de magnesio u otras que puedan contener las aguas de amasado.

Cemento de alto horno.-

Tratándose de lograr cementos estables químicamente, según el principio de Vicat de la relación entre las partes de sílice y alúmina con respecto a las de cal y magnesia, se han fabricado aglomerantes partiendo de 60 partes en peso de klinker de Portland corriente y 40 de escorias de alto horno rápidamente enfriadas. Estas escorias son ricas en silicatos de calcio y hierro. Se consiguen buenos resultados,

COMPARACION DE RESISTENCIAS



eje x-x', tiempo en días.
eje y-y', resistencia en kg/cm²

curva A cemento Portland
curva B cemento aluminoso
curva C Supercemento

(De Materiales aglomerantes, Ing. López Franco)

pero inferiores a los que arroja el cemento aluminoso; el proceso de fraguado, si bien más rápido en estos cemento que en el Portland, es inferior al del cemento aluminoso propiamente tal.

Efecto del yeso en la fragua .-

El yeso se utiliza en la composición de los cementos como un agente regulador de los plazos de fraguado. Se agrega al klinker en proporción del 0,02 al 0,05 % en peso, ya sea en la forma de $SO_4Ca \cdot 2H_2O$, o en la de $2SO_4Ca \cdot 3H_2O$, debiéndose precaverse no sobrepasar la dosis máxima, porque disminuye apreciablemente las resistencias del cemento.

En los supercementos su dosificación se reduce al mínimo; debido que el yeso, además de controlar el fraguado hasta la conveniencia requerida, dá mayor elasticidad al cemento, este se puede amasar con un poco menos de agua; debido a esto, la avidez de agua en los supercementos es un poco superior a los Portlands comunes, y más aún en los cementos aluminosos, que no lo llevan como componente. Sin embargo estas diferencias no son muy apreciables.

Influencia de los componentes en la tonalidad térmica .-

Se vió antes el efecto que produce el desprendimiento de calor durante el fraguado en los tiempos de cristalización de los componentes anhidros del cemento. Este calor es diferente para los distintos ce-

mentos, y depende de los componentes minerales del klinker con que se les fabrica. Las calorías desprendidas por las sustancias básicas son:

aluminato tricálcico($3\text{CaOxAl}_2\text{O}_3$)	207 cal.
silicato tricálcico (3CaOxSiO_2)	120 cal.
aluminato ferricotetracálcico	100 cal.
silicato bicálcico(2CaOxSiO_2)	62 cal.

PUZZOLANAS.-

Son materiales silíceos de origen volcánico o artificiales, que aunque no son aglomerantes por sí mismos, contienen componentes que pueden combinarse con la cal a la temperatura ordinaria en presencia del agua, para formar compuestos que tienen poca solubilidad y poseen propiedades aglomerantes.

Fundamentalmente las ventajas del empleo de puzzolanas consisten en la mejora de las propiedades y economía en el costo del hormigón. Su uso adecuado produce una mayor docilidad, factor favorable para la reducción de la relación a/c; menor generación total de calor, y gran velocidad de su desarrollo en una edad temprana, con una consiguiente aceleración del endurecimiento; menor apetencia de agua y menor separación de los ingredientes sólidos. Todos estos factores redundan en una mayor compactación del hormigón, mayores resistencias a toda edad que los normales, y un apreciable ahorro en las cantidades de cemento requeridas.

Análisis químico.-

El análisis de las puzzolanas acusa siempre SiO_2 y Al_2O_3 principalmente, y casi siempre algo de Fe_2O_3 y MgO ; es decir los mismos agentes de los cementos con defecto de CaO . Su constitución es parecida a la de las arcillas, de las que se pueden obtener por calcinación.

Clasificación mineralógica.-

Las puzzolas se pueden clasificar como sigue:

- 1) arcillas y pizarras (activadas por calcinación)

Caolinita.

Montmorillonita.

2) Materiales opalinos (calcinación prescindible)

Tierra de diatomeas.

Semiópalos.

3) Tobas volcánicas, pumicitas o pómez puzzolánicas (calcinación prescindible)

Tipos riolíticos.

Tipos andesíticos.

4) Subproductos industriales.

Escoria básica de altos hornos.

Ceniza volante

Humo silíceo.

Los materiales puzzolánicos arcillosos, las cenizas volcánicas alteradas y las tobas, así como las pizarras, deben calcinarse a temperaturas comprendidas entre los 500 y 950°C, para hacer activo el constituyente arcilloso y disminuir las exigencias de agua del material obtenido.

La escoria de altos hornos es la que se utiliza en la fabricación del cemento así denominado, rico en aluminatos.

La ceniza volante es una puzzolana artificial obtenida de la combustión de carbón pulverizado en la obtención del fósforo; contiene $Al_2(OH)_6$ y SiO_2CaO_3 , que como ya se ha indicado son importantes en la composición de cementos de alta resistencia inicial.

Función en el cemento.-

Además de las ventajas ya enumeradas, las puzzolanas hacen el papel de ácidos que se apoderan de la base segregada por la reacción de fraguado, la $Ca(OH)_2$ impidiendo que esta actúe sobre las sales disueltas en el agua, y formando compuestos insolubles que ocupan un gran porcentaje de

los huecos debidos al agua, de cierta resistencia mecánica que se suma a la lograda por el aglomerante.

Otro papel importante es que pueden dominar la reacción alcalina del cemento sobre los áridos. Las más importantes para este efecto son ciertas arcillas amorfas, ópalo puro o rocas muy opalinas, tierra de diatomeas, algunas pumicitas riolíticas, y ciertos vidrios silíceos artificiales.

Algunos tipos de puzzolanas aumentan la necesidad de agua del hormigón si se emplean en cantidades suficientes para dominar totalmente la reacción alcalina del cemento, debido al bajo peso específico que poseen y en algunos casos a su gran finura de grano en estado natural. Las exigencias en este sentido pueden conservarse dentro de límites aceptables empleando agentes que aumenten la docilidad del hormigón.

Conclusiones sobre los métodos de aceleración de fragua
y endurecimiento.-

Los sistemas que se han expuesto pueden clasificarse según su acción en factores de aceleración brusca o intensa, y factores de aceleración lenta; estos últimos excusan su acción más por efectos mecánicos sobre el endurecimiento, que sobre el proceso inicial de fraguado.

Es así como todos los métodos que se aplican a la reducción de la relación a/c , favorecen la compacidad del preparado a todas las edades, debiéndose a ella las características que se obtienen en el aumento apreciable de la resistencia a edades tempranas, y mantenidas en las mayores.

El efecto que produce la mayor o menor cantidad de agua presente en la mezcla, sobre el fraguado propiamente tal, afecta, como expusimos, los fenómenos químicos respectivos; su disminución hace que se produzcan con más rapidez las cristalizaciones de los componentes del cemento, porque el medio se satura rápidamente; por lo tanto, además de los beneficios mecánicos que acarrea una baja relación a/c , es deseable manejarla siempre como un recurso para reducir los plazos de adquisición de resistencias óptimas, fundamentalmente por pertenecer su técnica a la operación normal del hormigón; ningún otro método, excepto el uso de cementos específicamente e-

laborados para obtener estos beneficios, ofrece la seguridad de mantener la normalidad de un preparado.

El presentar ante los complejos a que dá lugar la química del cemento, agentes que si bien tienen acusada validez en la aceleración de la fragua y el endurecimiento, sin conocerse a fondo, o sin haberse resuelto más que por limitaciones de cantidad, las alteraciones que puedan provocar en esos complejos, es un factor que desfavorece en este tipo de acción.

Cabe deducir consecuentemente, que los mayores beneficios para el fin perseguido, sin el menor riesgo, se obtienen de todo método que conduzca a la disminución de la relación a/c; y como la técnica del hormigón ha creado, o está, en función de una determinada trabajabilidad mínima del material en su etapa de moldeo, los mejores métodos serán aquellos que produzcan esta ventaja sobre el hormigón in situ; y cualquier sistema que produzca esta ventaja antes del moldeo, sin disminuir la trabajabilidad, debe aceptarse a condición de que no produzca efectos secundarios de índole negativa.

Pier Luigi Nervi defiende el uso, para las estructuras que trabaja, de hormigones dotados de alta fluidez, necesaria para la adaptación a las formas especiales de estructura que él ha perfeccionado; la manera de conseguirlo es por efecto de la cantidad de agua; sin embargo, lamenta el tiempo alto requerido de permanencia del hormigón en los moldes. Vale hacer notar respecto a estas afirma-

ciones, como una reducción de la relación a/c in situ puede resolver un problema constructivo con categoría igual a la técnica estructural alcanzada.

Conviene establecer que los requerimientos de tiempo, amortización de capital invertido en moldaje y calidad del producto, se satisfacen enormemente con las solas ventajas de la reducción intensa de la relación a/c ; sin embargo es posible, y de resultados de esta investigación aconsejase, aumentar los beneficios obtenidos de ella con una complementación con otros métodos, que actualmente se utilizan como únicos responsables de las ventajas buscadas.

Tal es el caso, por ejemplo, del curado al vapor, que a excepción de su aplicación en hormigones o morteros centrifugados, para la fabricación de tubos, no se utiliza en ningún otro sistema en inter-relación con la disminución de las relaciones a/c .

CAPITULO V

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS DE LA DISMINUCION DE LA RELACION A/C EN LAS RESISTENCIAS INICIALES DEL HORMIGON.-

Adopción de un sistema.-

Para una apreciación categórica de los efectos que las bajas relaciones a/c producen en las resistencias de un hormigón, iniciales o a toda edad, se precisaba un sistema en el que esas bajas relaciones se produjeran de una manera acentuada, y por efectos físicos, para evitar incorporar al preparado agente alguno por cuya presencia se pudiese alterar los fenómenos intrínsecos del proceso de fragua y endurecimiento del cemento.

De acuerdo con el Director del Instituto de Edificación Experimental, se eligió el sistema de centrifugado, que presentaba los requisitos anteriores, y la posibilidad de construirse el aparato requerido en el mismo Instituto.

El sistema.-

El centrifugado de hormigón consiste en someter su masa a un movimiento circular, con respecto a un centro de giro,

para que la fuerza centrífuga creada arrastre las moléculas de agua al exterior del molde, quedando retenida una mínima parte para la humectación del cemento.

El hormigón centrifugado se aplica industrialmente en la fabricación de tubos pre-moldeados, con el objeto de lograr un perfecto asentamiento del hormigón contra las superficies interiores del moldaje, una perfecta terminación interior, y eliminación parcial de agua, relativamente poca. En esta industria, el factor principal del rápido endurecimiento de los tubos, es el curado al auto clave a que son sometidos después de centrifugados.

En resumen, la acción de centrifugado produce dos fenómenos: Uno, la expulsión de agua, y otro, el asentamiento de la masa sólida a medida que el agua expulsada deja tras de sí los espacios que ocupaba.

Las ventajas de esta acción se manifiestan en que el hormigón puede ser preparado con relaciones a/c favorables a su trabajabilidad; una vez centrifugado el hormigón, es que se producen relaciones que no permitirían ninguna trabajabilidad, pero aquél ya estaría moldeado; por otra parte, durante el proceso se pueden controlar fácilmente las pérdidas de agua; y por último estas pérdidas en volumen resultan ser la medida de la compactación ^{del} material.

Proyecto de la
máquina centri-
fugadora.-

La forma de conocer los efectos de la disminución de la relación a/c en el hormigón, es la sumisión de probetas en las que se haya operado, a la acción del Soil-test, con que cuenta el Instituto; esta máquina requiere probetas de dimensiones que se ajusten a sus normas, cúbicas o cilíndricas.

Como tipo de probeta se escogió la cúbica; por las siguientes razones:

- 1°.- Posibilidad de ubicarla a una distancia tal del centro de rotación, que permitiera una acción centrífuga lo más homogénea posible en su masa, lo que no sucedería con la probeta circular, que necesariamente debería ser centrifugada sobre su eje.
- 2°.- La distancia entre el centro de gravedad de la masa centrifugada y el centro de rotación, por ser función directa de la fuerza centrífuga, se procuró la mayor posible, a fin de que los efectos de aquella fueran apreciables; la probeta cilíndrica, al centrifugarse necesariamente sobre su eje, por pasar este por su centro de gravedad, se sometería a una fuerza centrífuga bastante menor.

Los efectos mecánicos de la deformación plástica de la probeta, están en función de la curvatura de giro; cuanto mayor sea esta menor será la flecha del arco que tiende a formarse en la superficie interior de la masa; por esto se requería una distancia tal que los redujese en lo posible.

Por precaución se planteó la masa a centrifugar con el menor valor posible , tanto por la potencia del motor con que se contó inicialmente (3/4 HP) como por el peligro que representaba un desprendimiento accidental del molde con la probeta, bajo la acción de una fuerza centrífuga que sería tanto mayor cuanto mayor fuese la masa centrifugada y el radio de rotación.

La velocidad de rotación necesaria para obtener una fuerza centrífuga favorable, se determinaría experimentalmente; por tal razón, a partir de la velocidad máxima del motor se dispusieron tres reducciones: 0,67, 0,45, y 0,25.

Ejecución de la máquina.-

Excepto trabajos de torno indispensables para la calibración de las poleas con respecto a los ejes, cajas de rodamientos y un buje calibrado, todo el trabajo fue realizado en el Instituto de Edificación Experimental bajo la inspección y ayuda técnica de sus miembros; la máquina es enteramente metálica, y sus características generales se aprecian en el corte que aparece en la lámina siguiente. La ejecución de este trabajo incluyendo un par de moldes metálicos de 1 dm³ de contenido después del centrifugado, demoró 45 días.

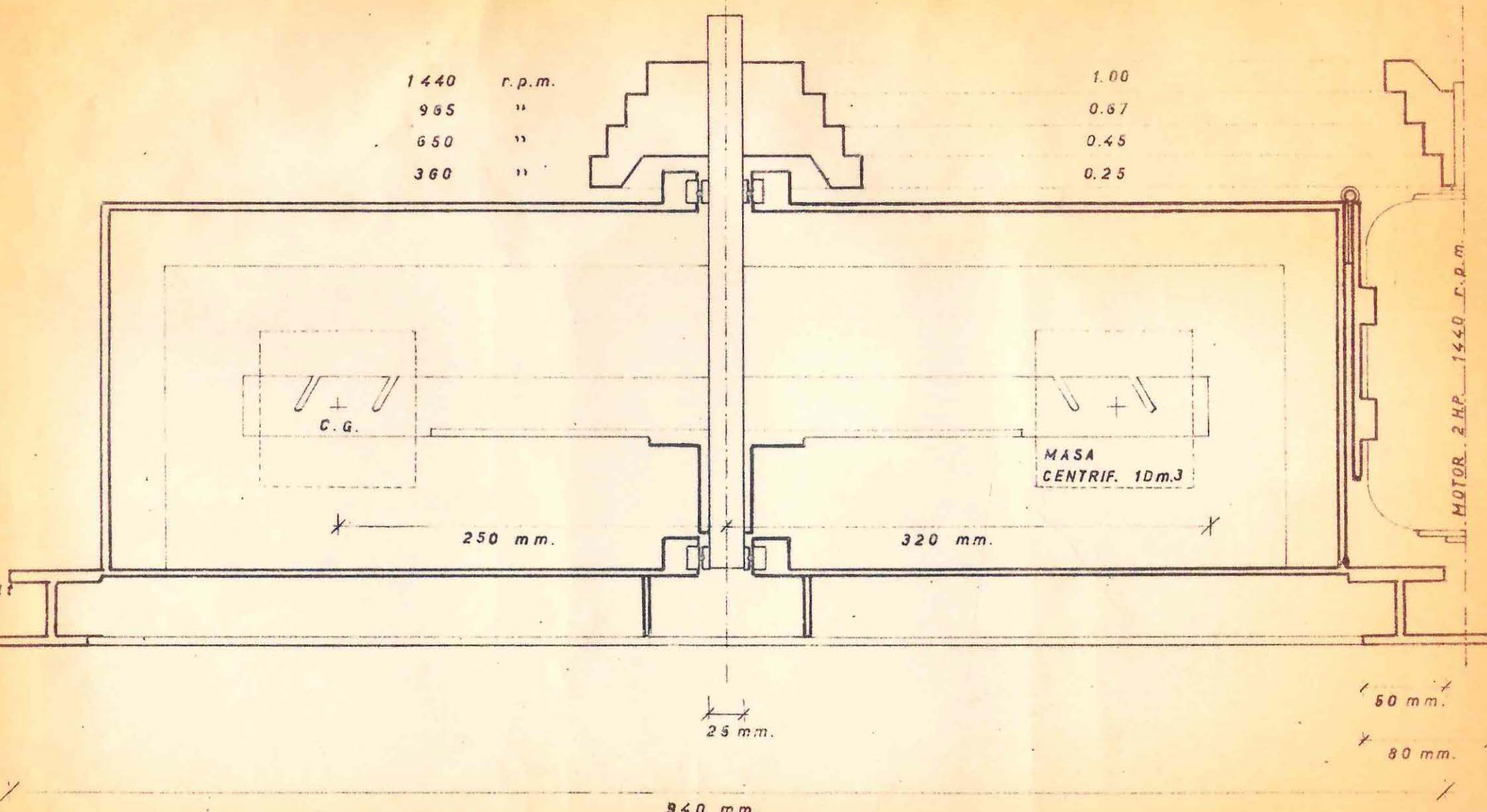
Cálculo.-

Datos:

Velocidad del motor		1440 r.p.m.
Velocidad máxima en el eje		1440 r.p.m.
1a. reducción	$1440 \times 0,67 =$	965 r.p.m.
2a. reducción	$1440 \times 0,45 =$	650 r.p.m.
3a. reducción	$1440 \times 0,25 =$	360 r.p.m.

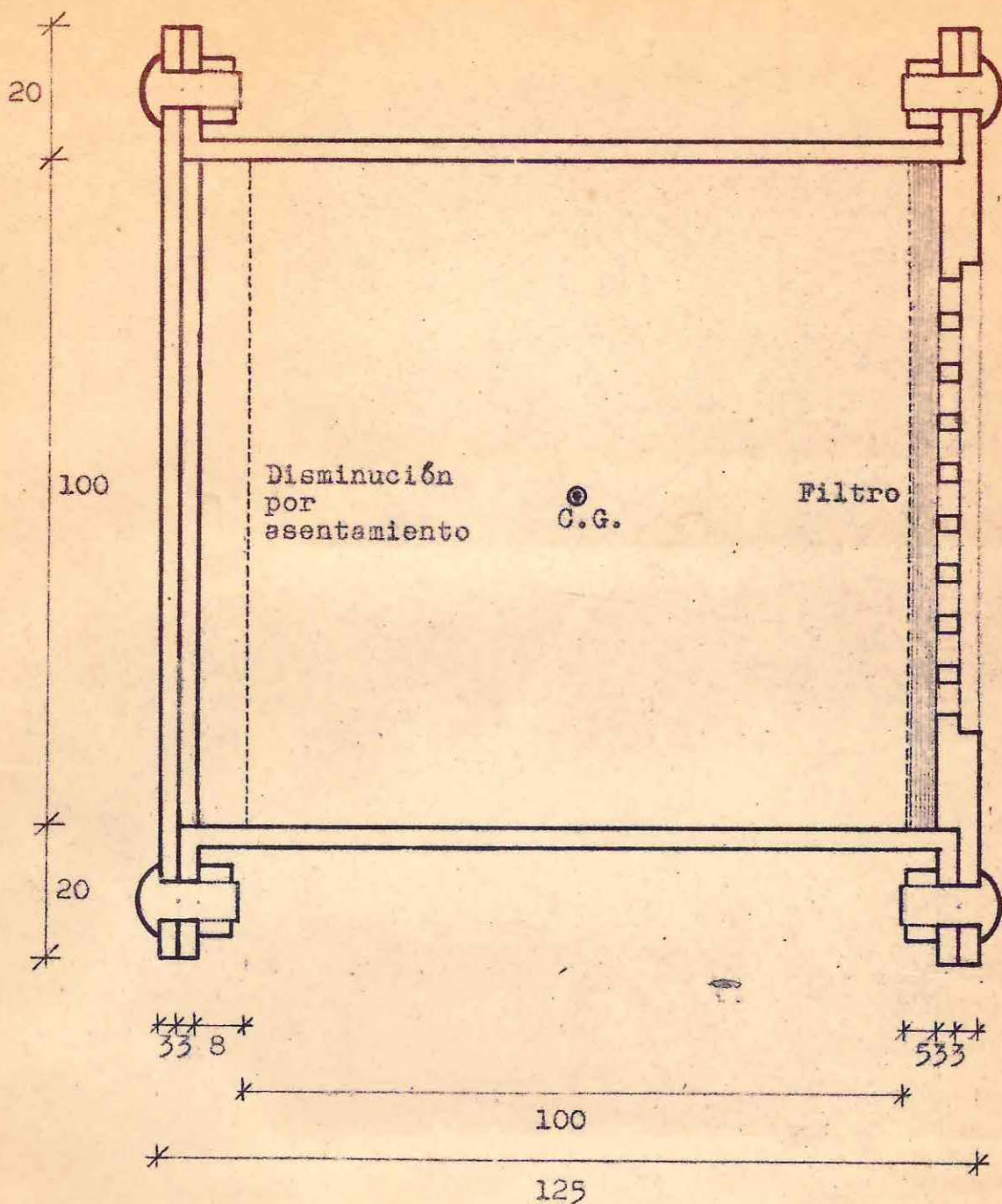
1440	r.p.m.
965	"
650	"
360	"

1.00
0.67
0.45
0.25



MOTOR 2 H.P. 1440 r.p.m.

CORTE DIAGONAL DE LA MAQUINA CENTRIFUGADORA ESC. 1:33 $\frac{1}{3}$



escala natural.

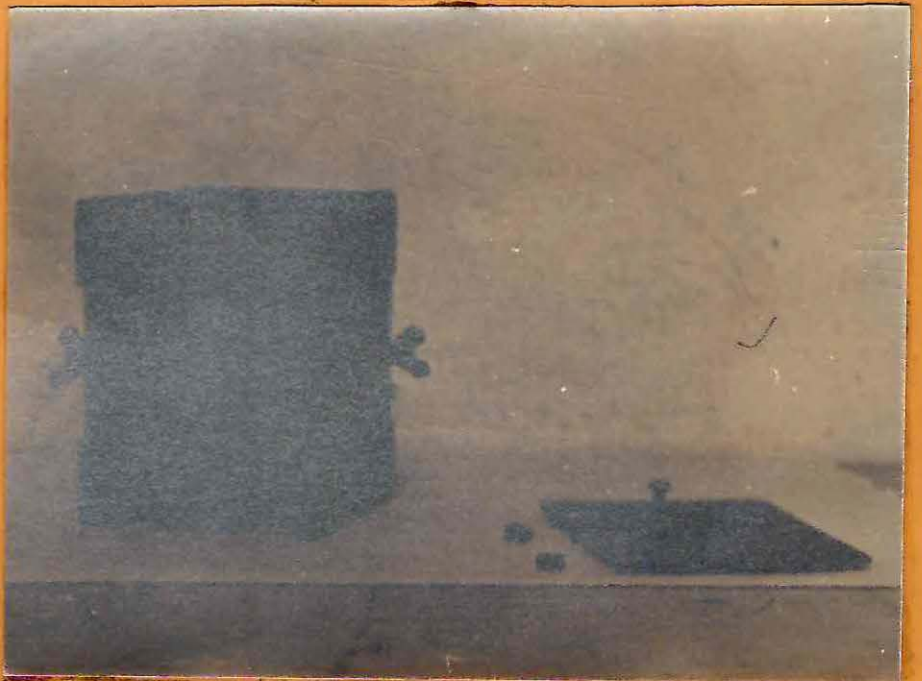
CORTE DEL MOLDE EN EL SENTIDO DE LA CENTRIFUGA.

El filtro está constituido por varias capas de papel secante reforzadas con una malla de bronce fosfórico.

El molde, enteramente desarmable, fué hecho de pletina de fe de 3 mm, con los ángulos de apernamiento y refuerzos soldados.



LA MAQUINA CENTRIFUGADORA



MOLDE



FRONTERAS

Fuerza centrífuga a las velocidades elegidas.-

1a.- 965 r.p.m.

a) velocidad angular $w = \frac{\pi r \times n}{30}$

$$w = \frac{3,14 \times 0,25 \times 965}{30} = 25,5 \text{ m/seg.}$$

b) velocidad circunferencial

$$v = r \cdot w = 0,25 \times 25,5 = 6,4 \text{ m/seg.}$$

c) aceleración

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \frac{41}{0,25} = 16,6 \text{ m/seg.}$$

d) centrífuga Peso total = 6,000kg

$$C = \frac{P}{g} \times a_n = \frac{6,000}{981} \times 16,6 = 102 \text{ kg}$$

2a.- 650 r.p.m.

Efectuados los mismos cálculos que para la velocidad anterior, la fuerza centrífuga resultante fue de 45 kg.

Elección de la relación a/c.-

La acción de centrifugado tiende a crear en la probeta una deformación que se manifiesta en su cara interna, al formarse un menisco cóncavo cuyo centro de curvatura está situado en el eje de rotación de la máquina.

Al aumentarse la docilidad del hormigón, el fenómeno anterior se manifiesta con más intensidad; para el sometimiento de la probeta a la prueba de ruptura, es imprescindible contar con una forma cúbica definida.

Otro factor considerado en esta elección, es el de la extracción de agua de la probeta. A menor cantidad de agua presente, en menor tiempo de centrifugado se alcanzará la eliminación requerida. Se pudo observar en tres pruebas con distinta relación a/c,

que a mayor valor alcanzado por ellas, se producía una retención de agua superior a las de menor relación a/c. Para lograr una eliminación en porcentajes iguales, fue necesario emplear la velocidad máxima del motor, 1440 r.p.m., velocidad esta a la que se producen fuertes deformaciones plásticas en la probeta.

Por las razones anteriores, se eligió una relación a/c de valor 0,5, que daba además el límite de trabajabilidad requerida para el vaciado manual de los moldes.

Hormigón empleado.-

a) Tamaño máximo de agregado.-

Por el tamaño de la probeta, de 1 dm³, se eligió un hormigón con un tamaño máximo de agregados de 20 mm, y un mínimo de 6 mm, siendo el máximo de la arena de 5 mm.-

b) Debido a la fuerza centrífuga, y a la disminución de volumen, por la eliminación de una cierta cantidad de agua, se producen dos fenómenos básicos para el estudio de la dosificación; el primero es el arrastre hacia la cara exterior del molde de los granos más finos del hormigón, entre los intersticios de los más gruesos, produciéndose falta de ellos en las secciones interiores de la probeta; y el segundo, con el mismo efecto, es la disminución del volumen de la pasta. Para subsanar este inconveniente, se planteó un hormigón rico en pasta, determinándose un 5 % de aumento en los huecos del ripio, para que en esta forma el centrifugado no enmagreciera las secciones interiores.

c) Diseño.- Se usó el sistema de dosificación por peso, con los siguientes datos:

- . Relación a/c 0,5
- . Cemento 400 kg/m³
- . Arido máximo 20 mm
- . % de arena 0,37 + 0,05
- . Peso específico neto de la arena 2,66
- . Peso específico neto del ripio 2,7

Volumen absoluto de la pasta.-

$$\frac{C}{p.e.} + H_2O + \text{litros aire } 1000/100$$

$$\frac{400}{2,99} + 200 + 10 = \text{vol. absoluto}$$

$$344 = \text{vol. absoluto}$$

Volumen agregados.-

$$\text{vol. agregados} = 1000 - 344 = \underline{656}$$

Volumen absoluto arena.-

$$\text{vol. arena} = 0,42 \times 656 = \underline{275} \text{ l.}$$

Peso arena por m³.-

$$275 \times 2,66 = \underline{730} \text{ kg}$$

Volumen absoluto de ripio.-

$$656 - 275 = \underline{381} \text{ l.}$$

Peso del ripio.-

$$381 \times 2,7 = \underline{1030} \text{ kg.}$$

Correcciones por humedad de la arena.

La cantidad de agua en peso contenida en la arena se determinó secándola, lo que arrojó una diferencia del 0,24 % ; en volumen, la arena contenía 7 l./m³.

Arena = $275 + 7 = 282$ l. = 750 kg

Agua = $200 - 7 = 193$ l. = 193 kg

Resultados.-

Cemento	400 kg
Arena	750 kg
Ripio	1030 kg
Agua	193 kg

Experiencias

Previas.-

Las primeras pruebas tuvieron como objeto determinar la operatoria de la máquina, obteniéndose normas sobre velocidades de centrifugado y duración del proceso, para lograr la mayor disminución posible de la relación a/c con la menor deformación plástica de la probeta.

Velocidad de

Centrifugado.-

Se obtuvo el mejor resultado usando dos velocidades; la primera, de 650 r.p.m. para asentar mecánicamente el preparado en el molde e iniciar la extracción de agua; y la segunda, de 965 r.p.m., para una vez estabilizada físicamente la probeta, provocar una extracción violenta del agua aún retenida.

Tiempo de

Centrifugado.-

La duración de cada velocidad fue definida por sucesivos tanteos; en la primera etapa (centrifugado a 650 r.p.m.) se suspendió a los 10 minutos la expulsión manifiesta de agua; consecuentemente se le hizo durar ese plazo. La segunda (centrifugado a 965 r.p.m.) expulsó el agua no adherida a la mezcla hasta el primer minuto; después, las cantidades expulsadas se hicieron casi inapreciables.

Resultados.-

Se dispuso para cada probeta a centrifugarse el siguiente método: 10 minutos a 650 r.p.m., y 1 minuto inmediatamente después a 965 r.p.m., con una pérdida total de agua entre 75 y 85 gr., normalmente para cada probeta, de 1 dm³ de volumen aproximado.

Relación a/c obtenida.-

Para determinar el peso de agua eliminada, se pesaron los moldes llenos, antes y después del centrifugado, habiéndose determinado previamente el peso del agua retenida por absorción, en el empaque filtrante. La diferencia anterior suada a la segunda cantidad, dió la cantidad de agua eliminada.

La Tabla siguiente, que agrupa los resultados de las tres etapas de ejecución de probetas, permite deducir la pérdida media de agua, y la relación a/c obtenida.

<u>Compactación</u>	<u>n° Prob.</u>	<u>Peso inicial</u> (inc. molde)	<u>Peso final</u> (Inc. molde)	<u>Peso agua</u> <u>eliminada</u>
VIBRADO	E ₁	5880 g	5775 g	105 g
	E ₂	5970	5875	95
	F ₁	5920	5825	95
	F ₂	5970	5865	105
apisonado(2a)	A ₁	5830	5755	75
	A ₂	5770	5705	65
	B ₁	5840	5765	75
	B ₂	5710	5525	85
	C ₁	6000	5915	85
	C ₂	5860	5775	85
	D ₁	5900	5815	85
	D ₂	5800	5725	75

apisonado(la)	B ₁	5850	5775	75
	B ₂	5950	5875	75
	C ₁	5860	5785	75
	C ₂	6000	5925	75
	D ₁	5950	5875	75
	D ₂	5900	5825	75
	E ₁	5940	5835	105
	E ₂	5970	5875	95
PERDIDA MEDIA DE AGUA				76 g.

Obtenido el valor medio del agua eliminada en un total de 20 probetas centrifugadas, para considerar la reducción en la relación a/c, se calculó, según la dosificación del hormigón empleado, un contenido de 200 gr. de agua y 400 gr. de cemento en cada probeta (1 dm³) con una relación a/c de valor 0,5; la reducción obtenida fue:

$$\frac{200 - 76}{400} = 0,3$$

La mínima relación a/c, obtenida en las probetas E₁ y F₁ (vibrado); y E₁ (apisonado la. exp.) fue:

$$\frac{200 - 105}{400} = 0,24$$

Fallas de Ejecución.-

En la primera experiencia, en la que se centrifugaron 10 probetas, se realizó un apisonado deficiente; esto produjo una deformación pronunciada; las probetas A₁ y A₂ se perdieron por haberse sometido solamente a 5 minutos de centrifugado. Por no haberse sometido las probetas a curado por inmersión, se anuló la comparación de resistencias a los tres días de estas respecto a testigos.

En las pruebas a los 7 días se a-

nularon dos probetas más por feltas en el paralelismo de las caras, producidas por flexiones debidas al calor de soldadura en las paredes de los moldes. En las siguientes experiencias se subsanó en parte este inconveniente puliendo las superficies sometidas a compresión, y posteriormente, afinándolas a yeso.

Constataciones generales.-

Se aprobaron las resistencias obtenidas con respecto a probetas testigos de la misma dimensión y dosificación, a los 3 y a los 7 días. El retiro de los moldes después de la operación, se realizó inmediatamente presentando la probeta altas condiciones de dureza, que permitieron su manejo con un mínimo de cuidado.

No se pudo hacer ninguna comparación entre los pesos específicos de las probetas recién centrifugadas y los testigos, debido a que el molde de estos era colectivo, para 5 y 10 unidades; además, en ese plazo no habían alcanzado ninguna condición de rigidez que permitiera manejarlos.

Las probetas centrifugadas en la 3a. experiencia, fueron compactadas por vibrado antes de la operación; pese a que la duración del proceso fue la misma que para las demás experiencias, estas probetas acusaron una mayor pérdida de agua, de 20 a 30 gr. sobre la media obtenida; se supone que esto sea debido a que las cualidades tixotropicas del hormigón al vibrarse, se mantuvieron durante el centrifugado, antes que regresara a su consistencia espesa; en estas condiciones, el agua pudo fluir más libremente.

Algunas probetas que presentaban u-

na leve deformación en su pared posterior a la dirección de la centrífuga, fueron probadas previa regularización de la superficie comprimida, mediante la alineación de sus aristas.

Resultados en

la resistencia.-

Los dos cuadros siguientes resumen los resultados obtenidos en las tres experiencias.

MEDIAS GENERALES PARA RESISTENCIAS A LOS TRES DIAS .-

	Prob.	Peso agua eliminada	Rel.a/c	Dens.	Sup.	Ruptura	Res.
CENT. 2a. EXP.	A ₁	75 g	0,30	2,47	102cm ²	21000	207
	B ₁	75	0,30	2,55	102	28000	275
	C ₁	85	0,29	2,55	102	29000	285
	D ₁	85	0,29	2,50	102	28000	275
TEST. 2a. EXP.	1"	-	0,50	2,40	102	13000	127
	2"	-	0,50	2,32	104	18000	173
	3"	-	0,50	2,20	100	10000	100
	4"	-	0,50	2,22	101	17000	169

RESISTENCIAS MEDIAS

probetas máx. 285

centrif. 266 mín. 207

Probetas máx. 173

testigos 142 mín. 100

% aumento

resistencia 83 %

DENSIDADES MEDIAS

probetas máx. 2,55

centrif. 2,52 mín. 2,47

probetas máx. 2,40

testigos 2,30 mín. 2,20

% aumento

densidad 9,7 %



MEDIAS GENERALES PARA RESISTENCIAS A LOS SIETE DIAS.-

Prob.	Peso agua eliminada	Rel.a/c	Dens.	Sup.	Ruptura	Resist.
E ₁ ¹	105	0,24	2,49	102 cm ²	36500	355
E ₂ ¹	95	0,26	2,49	104	39500	380
F ₁ ¹	95	0,26	2,65	99	39000	394
F ₂ ¹	105	0,24	2,50	104	33000	320
A ₂ ¹	75	0,30	2,49	104	31500	304
B ₂ ¹	85	0,29	2,49	98	38000	390
C ₂ ¹	85	0,29	2,70	98	39500	405
D ₂ ¹	75	0,30	2,62	98	37500	383
E ₂ ¹	95	0,26	2,53	105	38600	368
1 ¹	-	0,50	2,32	106	28000	264
2 ¹	-	0,50	2,33	106	26000	246
1 ²	-	0,50	2,20	105	14200	135
2 ²	-	0,50	2,28	106	20500	193
3 ²	-	0,50	2,31	108	22000	204
1 ³	-	0,50	2,35	98	24000	244
2 ³	-	0,50	2,30	98	22500	233

RESISTENCIAS MEDIAS

<u>Probetas</u>	<u>máx. 405</u>
<u>centrif. 368</u>	<u>mín. 320</u>
<u>probetas</u>	<u>máx. 264</u>
<u>testigos 217</u>	<u>mín. 135</u>
<u>% aumento</u>	
<u>resistencia</u>	<u>70 %</u>

DENSIDADES MEDIAS

<u>probetas</u>	<u>máx. 2,70</u>
<u>centrif. 2,56</u>	<u>mín. 2,49</u>
<u>probetas</u>	<u>máx. 2,35</u>
<u>testigos 2,30</u>	<u>mín. 2,20</u>
<u>% aumento</u>	
<u>densidad</u>	<u>11 %</u>

Resultados.-

Si bien estas experiencias, por haber sido las primeras realizadas sobre centrifugación de hormigones, contaron con muchos factores en contra, tales como la falta de

ortogonalidad de los moldes, debidas a deformaciones de sus paredes, o errores de procedimiento, han arrojado datos importantes sobre el efecto estudiado. Así, se puede constatar el alto porcentaje de aumento en las resistencias en ambas edades; en la primera, del 83 %, y en la segunda, del 70 %; se ha supuesto que el mayor valor del porcentaje a los 3 días, es debido más que todo a efectos de la relación a/c sobre la rapidez de fraguado; y la disminución que se acusa del mismo, a los 7 días, es porque pasa a sostenerlo solamente el rápido endurecimiento inicial, también debido a la disminución del agua presente, y a la alta compacidad obtenida.

Al aumento del peso específico puede atribuírse un valor medio del 10 %, considerando los constatados a ambas edades. El aumento que arroja la prueba a los 7 días, puede deberse, o a absorción de agua por la acción de curado, o a falta de un mayor número de probetas en la prueba a los 3 días.

Es evidente la superioridad del centrifugado por los efectos físicos obtenidos, sobre el tratamiento al vacío; este no posee la cualidad de aumentar el peso específico en la forma que lo hace el centrifugado, por compresión de material, además de la eliminación del agua.

Conclusiones
sobre el método.-

En gran parte, las ventajas del centrifugado de hormigones son disminuidas por el complejo mecánico del sistema; requiere su aplicación un montaje tal, que limita su utilidad a características de

formas, muy definidas. En la industrialización de este método, su única aplicación ha sido hasta ahora la del moldeo de tubos de gran diámetro, a baja velocidad y con una fuerza centrífuga resultante relativamente pequeña; en esta aplicación, no se ha podido dejar de hacer uso de un curado posterior al vapor; las ventajas de rigidez obtenidas para este caso son bajas, y el manejo de los preparados debe ser muy precautado.

Es recomendable en todo caso, la aplicación de un sistema de curado que garantice la obtención de resistencias elevadas; pero los beneficios generales tendrían mucho más valor siempre que estas aplicaciones posteriores se hicieran agotando las posibilidades del sistema.

El centrifugado por sí mismo, tal como se observó durante el desarrollo de las experiencias, se responsabiliza de ventajas en el endurecimiento inicial y en las resistencias a toda edad, de gran superioridad sobre varios sistemas convencionales; pero el centrifugado, aplicado acentuadamente, no es el límite de las posibilidades del material; así, los beneficios pueden incrementarse a valores mucho más elevados, complementando el método con sistemas de curado capaces de elevar aún más sus beneficios, o aplicando el sistema a partir de ventajas adquiridas previamente, como sería, por ejemplo, la fijación de las cales libres del cemento por aditivos puzzolánicos.

Las limitaciones debidas al complejo mecánico del sistema, son los requerimientos de giro. Esto hace que su adaptación se produzca favorablemente a formas

no rectilíneas, por lo menos en un plano de proyección. Sin embargo este inconveniente se puede subsanar en la fabricación de piezas de pequeño tamaño y con gran radio de giro.

Una aplicación favorable que se plantea como perspectiva de este sistema, es la pre-fabricación de piezas para estructuras espaciales, o estéreo-estructuras de hormigón, de curvaturas referidas a radios de relativa magnitud; para el centrifugado de estas piezas, el radio de curvatura puede ser disminuído, por lo menos para la conformación de la superficie intradós, ya que el extradós estaría definido por el molde continente.

Una aplicación más simple sería la pre-fabricación de piezas de sección circular para trabajos a la flexo-compresión. Estas piezas necesariamente deberían centrifugarse a muy altas velocidades sobre su eje geométrico; si bien las porciones próximas a este centro sufrirían una acción de centrifugado bastante baja, los requerimientos para un buen comportamiento a la flexo-compresión se presentan mayormente en sus secciones perimetrales, o sea, las más alejadas de la línea neutra; y aún, en estas piezas podría eliminarse la masa interior, planteándose hormigón solamente en aquellas partes que embeban la armadura, y que serían las más favorecidas por la acción del centrifugado.-