

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERIA

Departamento de Ingeniería Civil y Minas



“Colocación del Concreto Bajo Clima Caluroso”

Que para obtener el Título de:
INGENIERO CIVIL

Presentan:

Mario Cesar Omar Nava Rascón
Edgar Rodríguez García

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

índice

Capitulo I

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

Capitulo II

GENERALIDADES.....	3
2.1 Definición de Clima Caluroso.....	3
2.2 Posibles Problemas Causados por el Clima Caluroso.....	3
2.3 Posibles Problemas Causados por Otros Factores.....	4
2.4 Aspectos Referentes a la Colocación.....	4

Capitulo III

CEMENTOS.....	6
3.1 Que son los Cementos.....	6
3.2 Definición y Constitución.....	6
3.3 La Alita.....	7
3.4 La Belita.....	7
3.5 Aluminato tricálcico.....	8
3.6 La Celita.....	8
3.7 Finura del Cemento.....	9
3.8 Diferentes Tipos de Cementos Pórtland.....	10
3.9 Aspectos que Influyen en el Cemento en un Clima Caluroso.....	12
3.10 Cementos Adecuados al Clima Caluroso.....	13

Capitulo IV

FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO.....	16
4.1 Fenomenología.....	16
4.2 Proceso de Hidratación.....	17
4.3 Formación de la Estructura.....	20
4.4 Efecto de la Temperatura en el Proceso de Hidratación.....	24
4.4.1 Efectos en la proporción de Hidratación.....	24
4.4.2 Efectos en el Ultimo Grado de Hidratación.....	26
4.4.3 Efectos en la Naturaleza de los Productos de Hidratación.....	27
4.4.4 Efectos en la Estructura del Gel de Cemento.....	28
4.4.5 Efectos de Temperatura-Implicaciones Practicas.....	30
4.4.6 Efecto en el Tiempo de Fraguado.....	31
4.4.7 Efecto en la Proporción del Endurecimiento.....	31
4.4.8 Efecto en el Aumento de la Temperatura.....	32
4.5 Resumen Conclusiones y Comentarios.....	33

Capitulo V

AGREGADOS MINERALES Y MEZCLADO DE CEMENTOS.....	35
5.1 <i>Agregados Minerales.....</i>	35
5.2 <i>Agregados de Baja Actividad.....</i>	35
5.3 <i>Agregados Puzolanicos.....</i>	36
5.3.1 <i>Actividad de las Puzolanas.....</i>	36
5.3.2 <i>Clasificación de las Puzolanas.....</i>	36
5.4 <i>fly-ash Pulverizado (FAP).....</i>	37
5.5 <i>Humo de Sílice Condensado (HSC).....</i>	37
5.6 <i>Calor de Hidratación.....</i>	41
5.7 <i>Efecto sobre la Microestructura.....</i>	42
5.7.1 <i>Contenido de Hidróxido de calcio y el pH en el poro de agua.....</i>	43
5.7.2 <i>Desarrollo de Resistencia.....</i>	43

Capitulo VI

TRABAJABILIDAD.....	47
6.1 <i>Introducción.....</i>	47
6.2 <i>Factores que Afectan la Demanda de Agua.....</i>	47
6.2.1 <i>Propiedades de los Agregados.....</i>	47
6.2.2 <i>Temperatura.....</i>	50
6.3 <i>Factores que Afectan la Perdida del Revenimiento.....</i>	51
6.3.1 <i>Temperatura.....</i>	51
6.3.2 <i>Aditivos Químicos.....</i>	53
6.3.2.1 <i>Clasificación.....</i>	53
6.3.2.2 <i>Aditivos Reductores de Agua.....</i>	53
6.3.2.3 <i>Aditivos Retardantes.....</i>	54
6.3.2.4 <i>Superplastificantes.....</i>	56
6.3.3 <i>El fly-ash.....</i>	59
6.3.4 <i>Mucho Tiempo de Mezclado y la Entrega a Tiempo.....</i>	60

Capitulo VII

CONTROL DE LA TRABAJABILIDAD.....	63
7.1 <i>Aumento del Revenimiento.....</i>	63
7.2 <i>Aumentando el Revenimiento Inicial.....</i>	65
7.3 <i>Bajando la Temperatura del Concreto.....</i>	65
7.4 <i>Uso de Agua Fría.....</i>	66
7.5 <i>Uso de Hielo.....</i>	67
7.6 <i>Uso de Agregados Fríos.....</i>	68
7.7 <i>Retemplando.....</i>	70
7.8 <i>Retemplando con Agua.....</i>	70
7.9 <i>Retemplando con Superplastificantes.....</i>	73

Capitulo VIII

CAMBIOS VOLUMÉTRICOS.....	78
8.1 Introducción.....	78
8.2 Contracción Plástica.....	80
8.3 Factores que afectan la Contracción Plástica.....	83
8.4 Factores Medioambientales.....	84
8.5 El Cemento y las Mezclas Minerales.....	87
8.6 Contenido de Agua.....	88
8.7 Aditivos Químicos.....	90
8.8 Fibras de Refuerzo.....	91
8.9 Agrietamiento Plástico.....	91
8.10 Asentamiento y Agrietamiento Plástico.....	93
8.11 Contracción por Secado.....	93
8.12 Los Fenómenos.....	94
8.13 Contracción e Inflación de los Mecanismos.....	95
8.14 Tensión Capilar.....	95
8.15 Tensión Superficial.....	95
8.16 Incrementando la Presión.....	97
8.17 Movimiento del Agua en la capa Interna.....	97
8.18 Factores que Afectan la Contracción.....	98
8.19 Factores Medioambientales.....	98
8.20 Composición del Concreto y sus Propiedades.....	101
8.20.1 Concentración de los Agregados.....	101
8.21 Rigidez de los Agregados.....	105
8.22 Contenido de Cemento.....	106
8.23 Contenido de Agua.....	106
8.24 Relación A/C.....	106
8.25 Agregados Minerales.....	107
Conclusiones.....	111
Glosario.....	113
Bibliografía.....	116

Capítulo I

Introducción

Sabemos que el clima caluroso, representa en nuestra región un factor adverso, durante la fabricación de estructuras de concreto. Muchos son los problemas que se suscitan por un mal manejo de las altas temperaturas del concreto, así como el hecho de dejar de lado las recomendaciones de las horas adecuadas para una eficiente colocación.

El problema anterior, se vuelve más severo si las estructuras se construyen en un ambiente seco, un porcentaje muy alto de estructuras en nuestro medio reflejan las consecuencias de estos problemas: como grandes agrietamientos, oquedades bolsas y macro-vacíos, producto de un mal control de la temperatura y un deficiente manejo del concreto para este ambiente generando con ello un comportamiento en servicio inadecuado, así como una reducción a la durabilidad de la estructura. Lo anterior sobre-lleva a que se tengan que realizar grandes desembolsos en actividades de reparación de las estructuras.

De acuerdo con la perspectiva anterior, se elaboró este documento recogiendo la experiencia de algunos autores, que basaron sus investigaciones en éste campo de la ingeniería de materiales. El documento trata de rescatar, aquellos aspectos que a nuestro juicio sirvan para lograr un manejo adecuado durante la colocación del concreto en condiciones extremas.

Se trato de hacer un manejo de la información, que permitiera conjuntar aspectos prácticos y teóricos que armonizaran con los intereses de las personas en el ramo de la construcción. Así mismo, se trató de poner un énfasis especial en el texto, el cual esta dirigido a estudiantes de ingeniería civil que pudieran consultarlo durante su formación de licenciatura en ingeniería.

Una primera parte contempla las definiciones básicas del clima caluroso, su problemática generalizada y el manejo de sus constituyentes. Se pone énfasis especial en capítulo cuatro, donde se expone la fenomenología referente al fraguado y endurecimiento, como las etapas básicas en la comprensión del proceso de hidratación, formación de la estructura cristalina de la pasta de cemento y del efecto de la temperatura durante el endurecimiento. Se cita el uso de agregados minerales como posibles moderadores del fraguado, destacando el uso de fly-ash como el principal agregado para reducir el calor de hidratación y mejorar la manejabilidad bajo condiciones extremas.

Se pone especial atención al capítulo seis en lo que se refiere al principal factor a considerar previo a la colocación del concreto, como es el control de la trabajabilidad y a los factores que afectan la pérdida de agua.

Como una práctica muy usual, se estudia el uso de hielo y de agua fría para controlar la pérdida de revenimiento del concreto. Se citan los casos donde es posible aplicar un remezclado del concreto así como sus posibles consecuencias. En un último apartado se citan consecuencias del manejo de la temperatura en combinación con otros aspectos colaterales como la velocidad del viento, la radiación solar y la pérdida de evaporación, que trae consigo los aspectos no deseados en una estructura, como son los cambios volumétricos en estado fresco y endurecido del concreto.

Atentamente



PIC. Mario César Omar Nava Rascón



PIC. Edgar Rodríguez García

Capítulo II

GENERALIDADES

2.1 Definición de Clima Caluroso.

Se dice, que el clima caluroso es cualquier combinación de las siguientes condiciones que tienden a perjudicar la calidad del concreto fresco o endurecido; y provocando una aceleración de la tasa de pérdida de humedad y de hidratación del cemento o cualquier otra que cause resultados perjudiciales:

- a) Alta temperatura ambiente.
- b) Alta temperatura en el concreto.
- c) Baja humedad relativa.
- d) Radiación Solar.
- e) Velocidad del Viento.

Los efectos de la alta temperatura, radiación solar y baja humedad relativa se pueden hacer más pronunciados con la velocidad del viento. La posibilidad de tener problemas causados por clima caluroso puede ocurrir en cualquier momento en climas tropicales o áridos, y generalmente ocurren durante el verano en los demás climas. El agrietamiento debido a cambios térmicos, generalmente es más severo durante las estaciones de primavera y otoño. Esto se debe a que el diferencial de temperatura de cada 24 horas es más grande en estas estaciones del año. Las medidas de precaución serán menores en un día soleado, seco, húmedo, que las requeridas para un día soleado, seco, y con viento, aún siendo las temperaturas idénticas.

2.2 Posibles Problemas Causados por el Clima Caluroso.

Los problemas más comunes para el concreto en estado fresco son los siguientes:

- a) Incremento en la demanda de agua.
- b) Incremento en la velocidad de la pérdida del revenimiento con la correspondiente tendencia a añadir agua en el sitio de la obra.
- c) Incremento en la velocidad de fraguado, resultando en mayor dificultad con el manejo, compactación, acabado y mayor riesgo de la aparición de juntas frías.
- d) Incremento en la tendencia de agrietamiento por contracción plástica.
- e) Incremento en la dificultad de controlar el contenido de aire incluido.

Entre los posibles problemas causados en el concreto endurecido se pueden incluir:

- a) Menor resistencia a 28 días y a posteriores edades, como resultado de la mayor demanda de agua o mayores niveles de temperatura del concreto al momento de la colocación o durante los primeros días.
- b) Mayor tendencia a la aparición de grietas por secado y por diferencial térmico, debido al enfriamiento de toda la estructura o por una diferencia de temperaturas en la sección transversal del miembro.
- c) Reducción de la durabilidad debido al agrietamiento.
- d) Mayor variación en la apariencia de la superficie, como juntas frías, diferencia de color debido a las diferentes velocidades de hidratación por los cambios en la relación agua-cemento (A/C).
- e) Mayor posibilidad de corrosión en el acero de refuerzo. Debido al incremento en el agrietamiento, lo cual permite la entrada a soluciones corrosivas.
- f) Incremento de la permeabilidad.

2.3 Posibles Problemas Causados por Otros Factores.

Entre otros factores además de los climáticos se puede incluir:

- a) El uso de cementos con mayor velocidad de hidratación.
- b) El uso de concretos de alta resistencia, que requieren alto contenido de cemento.
- c) El diseño de secciones delgadas con el correspondiente incremento en el porcentaje de acero, que complica el colado y compactación del concreto.
- d) La necesidad económica de continuar el trabajo en clima extremadamente caluroso.
- e) El uso de cemento de contracción compensada.

2.4 Aspectos Referentes a la Colocación.

Se dice que cualquier daño causado por el clima caluroso, nunca podrá ser totalmente reparado. Por ese motivo, es necesario el buen juicio para seleccionar el mejor acomodo para el logro de la calidad, economía y factibilidad. Los procedimientos a usarse dependerán del tipo de construcción, las características de los materiales usados, y la experiencia de la industria local en el manejo de altas temperaturas ambientales, temperaturas elevadas del concreto, baja humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar.

Las dificultades más grandes ocurren cuando el personal encargado de colocar el concreto carece de experiencia para construir bajo condiciones de clima caluroso o haciendo algún tipo de construcción en particular. Debido a que las improvisaciones de último minuto raramente son exitosas, se deben tomar medidas preventivas haciendo énfasis en la evaluación de los materiales, planeación y compras anticipadas, así como la coordinación de todas las fases de la obra. Se deben planear los procedimientos detallados de mezclado, colocación, protección, curado, registro de la temperatura y pruebas del concreto durante el colado en clima caluroso. Es imperativo tomar precauciones para evitar el agrietamiento plástico. Se debe anticipar la posibilidad de formación de grietas debidas a cambios térmicos, a cambios de volumen o por restricciones internas. Algunos de los aspectos que se deben tomar en consideración para el control del agrietamiento son; elaboración de juntas, usar mayor cantidad de acero de refuerzo o fibras, limitar la temperatura del concreto, contenido de cemento, calor de hidratación del cemento, tiempo de remoción de cimbras y selección y dosificación del aditivo químico adecuado.

A continuación se presenta una lista de recomendaciones y medidas para reducir o evitar los posibles problemas del clima caluroso en la colocación de un concreto:

- a) Usar materiales y proporcionamientos para concreto con registros de campo adecuados, cuando se trabaje bajo condiciones de clima caluroso.
- b) Usar concreto enfriado.
- c) Usar concreto con consistencia que permita una rápida colocación y adecuada compactación.
- d) Transporte, coloque, compacte, y acabe el concreto con el menor retraso posible.
- e) Planifique el trabajo para evitar exposiciones adversas a las condiciones ambientales; programe las operaciones de colocación durante el horario del día o de la noche en que las condiciones del clima sean favorables.
- f) Proteja el concreto contra la pérdida de humedad durante todo el proceso de colocación y durante el período del curado.

Capítulo III

CEMENTOS

3.1 *Que son los Cementos.*

Se sabe, que los cementantes que se utilizan para la fabricación del concreto son hidráulicos, es decir fraguan y se endurecen por interacción química con el agua, aún estando inmersos en ella, característica que los distingue de los cementantes aéreos que solamente fraguan y se endurecen en contacto con el aire. Los cementos para concreto son elaborados basándose en el llamado clinker portland. Para la elaboración del clinker portland se emplean materias primas capaces de aportar principalmente cal (CaO), sílice (SiO_2), y accesoriamente óxido de hierro (Fe_2O_3) y alúmina (Al_2O_3), para lo cual se seleccionan materiales calizos y arcillosos de composición adecuada. Estos materiales se trituran, dosifican, muelen y mezclan íntimamente hasta su completa homogeneización, ya sea en seco o en húmedo. La materia prima así procesada, ya sea en forma de polvo o de lodo, se introduce en hornos rotatorios donde se calcina a la temperatura de clinkerización (alrededor de 1450°C), hasta que alcanza un estado de fusión. En este estado se producen una serie de reacciones químicas requeridas y el material se subdivide y aglutina en fragmentos no mayores a 6 cm, cuya forma se regulariza por efecto de la rotación del horno. A este material fragmentado, resultante de la calcinación, se le denomina clinker portland. Una vez frío, el clinker se muele finamente junto con unos por cientos de yeso para dar, lo que es normalmente un polvo fino de color gris que se conoce como cemento portland.

También el clinker, durante la molienda puede combinarse con una escoria o un material puzolánico, o bien puede molerse con otros materiales de carácter sulfo-calcio-aluminosos. Esto es, sin embargo, lo que nos dan las varias formas (o tipos) de cementos portland que incluyen, además los cementos portland ordinarios (CPO), cementos portland de rápido endurecimiento (CPRE), cementos portland de bajo calor de hidratación (CPBC), cementos portland con resistencia al sulfato (CPRS) y algunos otros. Se mostrará después, que las formas diferentes del cemento son producidas cambiando las proporciones de los materiales crudos, y es por eso también, la composición de la mineralogía de los cementos resultantes.

3.2 *Definición y Constitución.*

El cemento es un material heterogéneo compuesto de algunos granos finos y de minerales que se forman durante el proceso de clinkerización. Cuatro minerales, llamados Alita, Belita, Celita y una fase de Calcio con Aluminio, que constituyen un 90% del cemento y son colectivamente conocidos como compuestos mayores. De acuerdo con el siguiente 10% es conocido como compuestos menores.

La estructura de los constituyentes del cemento no siempre se conocen exactamente, y al diseñar aplicaciones que por su composición normalmente se escriben de una manera simple como un compuesto de óxidos, en una forma que aunque representando su composición química no implica ninguna estructura específica. Por ejemplo, la composición de la Alita que es esencialmente silicato tricálcico, se escribe como 3CaO SiO_2 o C_3S . Es más usual en química de cemento describir cada óxido por una sola letra, es decir $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$ y $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$. De acuerdo con, el silicato tricálcico se escribe como C_3S . Las propiedades del cemento portland son determinadas cualitativamente, pero no necesariamente son determinadas cuantitativamente por las propiedades de sus constituyentes individuales y su volumen en el cemento.

3.3 La Alita.

La Alita es esencialmente silicato tricálcico 3CaO SiO_2 o C_3S . Forma alrededor de un 45% en los cementos portland ordinarios y debido a este alto contenido, las propiedades y comportamientos de los anteriores son muy similares con ella. La Alita es conocida como una capa hidráulica. En adición con el agua la hidratación toma lugar alrededor del fraguado y posteriormente en el endurecimiento en unas cuantas horas. No se admite que durante el secado, el sólido resultante gane fuerza con el tiempo, principalmente durante los primeros 7 y 10 días. La fuerza de compresión en el fraguado de la Alita es comparativamente mayor, finalmente se alcanza con unas cuantas tensiones de Mpa (micras). La hidratación de la Alita es similar a la hidratación de los otros constituyentes del cemento, es exotérmica con la cuantificación del calor liberado que es alrededor de unos 500 J/g. En conclusión normalmente el C_3S aporta resistencia a corto y mediano plazo.

3.4 La Belita.

La Belita en el cemento portland es esencialmente un silicato dicálcico, 2CaO SiO_2 o C_2S . Esta, la Belita es un silicato de calcio pobre en la cantidad de cal comparada con la Alita. El porcentaje de este contenido en los cementos portland ordinarios es alrededor del 25%. En adición con el agua la hidratación de la Belita comparativamente libera una pequeña porción de calor, alrededor de 250 J/g. La Belita hidratada lentamente puede tomar unos cuantos días en fraguar. También la fuerza se desarrolla lentamente y proporciona bastante humedad y es aprovechada, en las siguientes semanas o meses. Esta última fuerza, de cualquier modo es bastante alta por el momento, en el mismo orden que el de la Alita. En conclusión el C_2S aporta resistencia a mediano y largo plazo, es decir, se complementa bien para que la adquisición de resistencia se realice en forma sostenida.

3.5 Aluminato tricálcico.

Dentro de esta forma pura de Aluminato tricálcico ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ o C_3A) al reaccionar con el agua poco instantánea es caracterizado por un fraguado rápido que es acompañado por una cantidad larga de calor evolucionado, alrededor de 850 J/g . En conclusión el C_3A es tal vez el compuesto que se hidrata con mayor rapidez, y por ello propicia mayor velocidad en el fraguado y en el desarrollo de calor de hidratación en el concreto. Así mismo, su presencia en el cemento hace al concreto más susceptible de sufrir daños por efecto del ataque de sulfatos. Por todo ello, se tiende a limitarlo en la medida que es compatible con el uso del cemento.

3.6 La Celita.

La Celita es un fierro muy aguantador base del cemento portland. La Celita es asumida por tener un porcentaje de composición de aluminoferrito tetracálcico ($4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ o C_4AF) y este porcentaje contenido en los cementos portland ordinarios es alrededor del 8%. La Celita hidratada fragua rápidamente y esto ocurre en unos cuantos minutos. La evolución del calor hidratado es aproximadamente de 420 J/g . La Celita es la que le da la característica del color grisáceo al cemento, es decir en ausencia de la fase anterior el color del cemento es blanco. Con esto admitido, puede decirse que la composición química de un clinker portland se define convenientemente mediante la identificación de cuatro compuestos principales, cuyas variaciones relativas determinan los diferentes tipos de cementos portland (tabla 3.1).

Compuesto	Fórmula del óxido	Notación abreviada
Silicato tricálcico (Alita)	3CaO SiO_2	C_3S
Silicato dicálcico (Belita)	2CaO SiO_2	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrito tetracálcico (Celita)	$4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Tabla 3.1 Los cuatro compuestos principales del cemento.

3.7 Finura del Cemento.

La finura del cemento, se dice que es normalmente definida por el área de su superficie específica, dada el área total de la superficie de todo los granos contenidos en una unidad de peso del cemento. De acuerdo con el grano más pequeño de tamaño, se da la mejor área de su superficie específica, y viceversa. Al aumentar la finura, el cemento se hidrata y adquiere resistencia con más rapidez, y también se manifiesta mayor disposición en sus partículas para mantenerse en suspensión en la pasta recién mezclada, lo cual es ventajoso para la cohesión, manejabilidad y capacidad de retención de agua en las mezclas de concreto. El grano más pequeño en el cemento, la mayor área de la superficie que se expone al agua y, por consiguiente, la más alta proporción de hidratación. Como contrapartida, una finura más alta representa mayor velocidad en la generación de calor y mayor demanda de agua de mezclado en el concreto, cuyas consecuencias son indeseables porque se traducen en mayores cambios volumétricos del concreto y posibles agrietamientos en las estructuras. También se mostrará después, que la proporción de desarrollo de fuerza, aumenta con la proporción de hidratación. Se espera, por consiguiente, que la proporción de desarrollo de fuerza también aumentará con la finura. Esto se confirma por los datos de la Fig.3.2 que también indica que el efecto de finura en resistencia es mejor en las edades más tempranas, disminuyendo con el tiempo como los beneficios de hidratación.

Se explicará después en el texto, que los granos de cemento se encapsulan en una capa densa producto de la hidratación. Esta capa, retarda la difusión del agua, y por eso se retarda la hidratación hasta que en alguna fase se detiene completamente. La proporción de hidratación en esta fase es determinada después por la proporción de difusión del agua, y el tamaño del grano de cemento se vuelve de importancia secundaria.

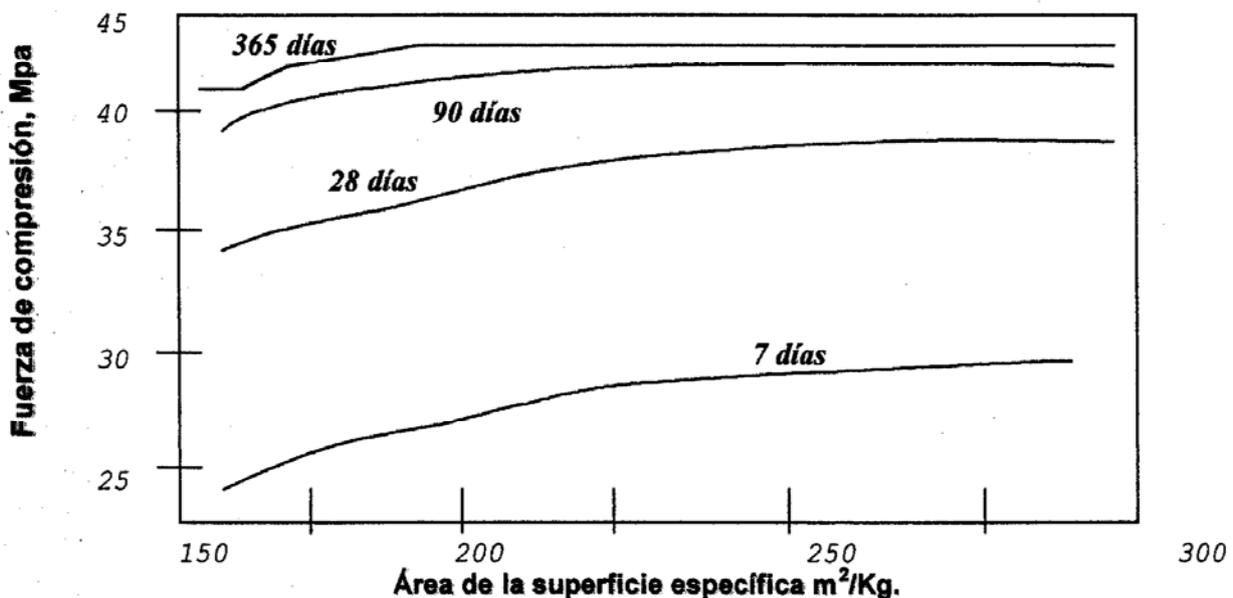


Fig.3.2. Efecto del área de la superficie específica del cemento Portland en el desarrollo de fuerza en el concreto.

3.8 Diferentes Tipos de Cementos Portland.

De conformidad con lo anterior, a partir del clinker portland es posible fabricar tres principales grupos o clases de cementos hidráulicos para la elaboración de concreto:

- 1) Los cementos portland ordinarios, o portland simples, moliendo solamente el clinker y el yeso sin componentes cementantes adicionales.
- 2) Los cementos portland mezclados, combinando el clinker y el yeso con otro cementante, ya sea este una escoria o una puzolana.
- 3) Los cementos expansivos que se obtienen añadiendo al clinker otros componentes especiales de carácter sulfatado, cálcico y aluminoso.

El primer grupo constituye los cementos que se han utilizado tradicionalmente para la fabricación del concreto hidráulico en el país. Los del segundo grupo son cementos destinados al mismo uso anterior, y finalmente los del tercer grupo son más recientes y su utilización tiende a aumentar en EUA para las llamadas estructuras de concreto de contracción compensada. Así, mediante ajustes en la composición química del clinker, o por medio de la combinación con otros cementantes, o por la adición al clinker de ciertos materiales especiales, es factible obtener cementos con características y propiedades adecuadas para cada uso específico del concreto hidráulico. Para apreciar la composición y finura para los tipos normales de cementos portland se muestra por los datos de la tabla 3.3, y en la tabla 3.4 se hace un recuento de las clases y tipos de cementos para concreto hidráulico, incluyendo sus características.

ASTM tipos	Silicato tricálcico (C ₃ S) (%)	Silicato dicálcico (C ₂ S) (%)	Aluminato tricálcico (C ₃ A) (%)	Aluminoferrito tetracálcico (C ₄ AF) (%)	Permeabilidad del aire en el área de la superficie específica (m ² / kg)
I	42-65	10-30	0-17	6-18	300-400
II	35-60	15-35	0-8	6-18	280-380
III	45-70	10-30	0-15	6-18	450-600
IV	20-30	50-55	3-6	8-15	280-320
V	40-60	15-40	0-5	10-18	290-350

Tabla 3.3 Composición aproximada y finura para los tipos normales de cementos portland.

CEMENTOS PARA CONCRETO HIDRAULICO			
Tipo	Denominación	Clase Resistente	Características
CPO	Cemento Portland Ordinario	20	RS
CPP	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R	BCH
CPC	Cemento Portland Compuesto	40	B
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	40 R	
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		

Tabla 3.4 Tipos de cementos portland para concreto hidráulico.

- La clase resistente (resistencia mecánica normal a compresión a 28 días) de un cemento se indica con los valores por ejemplo; 20,30,40.
- Si el cemento posee una resistencia rápida (resistencia mecánica a la compresión a 3 días) se añade la letra "R", por ejemplo; 30 R.
- RS = Resistente a los sulfatos.
- BRA = Baja reactividad álcali-Agregado.
- BCH = Bajo Calor de Hidratación.
- B = Blanco.

Cemento Portland Ordinario.

El cemento portland ordinario es un cemento de uso general, adecuado para ser empleado cuando las propiedades especiales de los demás tipos de cemento no sean necesarias. Se utiliza en concretos que no estén sujetos al ataque de factores agresivos tales como el ataque a los sulfatos existentes en el suelo o en el agua o en los concretos que tengan un aumento cuestionable de temperatura debido al calor generado durante la hidratación. Entre sus usos se incluyen pavimentos, pisos, edificios de concreto reforzado, puentes, estructuras para vías férreas, tanques y depósitos, tuberías, mamposterías, y otros productos de concreto prefabricado.

Cemento Portland Puzolánico.

Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker portland, materiales puzolánicos y usualmente sulfato de calcio.

Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno.

Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker portland, escoria granulada de alto horno y usualmente sulfato de calcio.

Cemento Portland Compuesto.

Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta del clinker portland que, usualmente contiene sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, éste puede ser componente único.

Cemento Portland con Humo de Sílice.

Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker portland, humo de sílice y usualmente sulfato de calcio.

Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno.

Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker portland y mayoritariamente escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

3.9 Aspectos que Influyen en la Selección de un Cemento en un Clima Caluroso.

Las condiciones que deben tomarse en cuenta para especificar el concreto idóneo y seleccionar el cemento adecuado para una obra, pueden determinarse por la indagación oportuna de dos aspectos principales: 1) las características propias de la estructura y de los equipos y procedimientos previstos para construirla, y 2) las condiciones de exposición y servicio del concreto, dadas por las características del medio ambiente (en este caso las altas temperaturas) y del medio de contacto y por los efectos previsibles resultantes del uso destinado a la estructura. Existen diversos aspectos del comportamiento del concreto en estado fresco o endurecido, que pueden ser modificados mediante el empleo de un cemento apropiado, para adecuarlos a los requerimientos específicos dados por las condiciones de la obra. Las principales características y propiedades del concreto que pueden ser influidas y modificadas por los diferentes tipos y clases de cemento, son las siguientes:

Concreto fresco	{	Cohesión y manejabilidad Pérdida de revenimiento Asentamiento y sangrado Tiempo de fraguado
Concreto endurecido	{	Adquisición de resistencia mecánica Generación de calor Resistencia al ataque de los sulfatos Estabilidad dimensional (cambios volumétricos) Estabilidad química (reacciones cemento-agregado)

En algunos aspectos la influencia del cemento es fundamental, en tanto que en otros resulta de poca importancia porque existen otros factores que también influyen y cuyos efectos son más notables. No obstante, es conveniente conocer y tomar en cuenta todos los efectos previsibles en el concreto, cuando se trata de seleccionar el cemento apropiado para una obra donde la temperatura ambiente es un factor de importancia en este caso un clima caluroso.

3.10 Cementos Adecuados al Clima Caluroso.

Para este caso en particular los cementos más adecuados al clima caluroso son: Los cementos portland puzolana y el cemento portland compuesto. El cemento portland puzolánico es idóneo para prefabricación mediante tratamientos higrotérmicos del concreto, bien con vapor libre o, mejor todavía, con vapor a presión en autoclave. Así mismo, el cemento portland puzolánico es adecuado en caso de tener que emplearse en un concreto, agregados reactivos con los álcalis del cemento portland ordinario, en primer lugar porque la adición de puzolana reduce la proporción de clinker portland y con ella la de los álcalis que ésta aporta y en segundo lugar porque la de la propia puzolana fija álcalis y evita o atenúa la acción sobre los agregados reactivos. Aparte de otros aspectos específicos, de naturaleza y consideración físicas. También el cemento portland puzolánico es de bajo calor de hidratación, pudiendo dar la totalidad, o mucho de ellos, sobre todo a cortas edades, calores de hidratación inferiores incluso a los de la generalidad del cemento portland ordinario. Por todas estas circunstancias, los cementos portland puzolánicos son idóneos para obras de concreto en contacto con aguas agresivas de cualquier naturaleza, pero en particular puras, carbónicas y ligeramente ácidas. Son así mismo, aptos para concreto en grandes masas en que interese evitar una gran elevación de temperatura, y con ello la retracción y fisuración de origen térmico. Por ambas circunstancias son especialmente indicados para concreto de presas y cimentaciones masivas. No son en cambio, los más adecuados para concreto pretensado, particularmente con escasos recubrimientos (ver tabla 3.5).

Tipo de Cemento	Clase Resistente	Utilizable para:	No recomendables, salvo precauciones especiales, para:	Precauciones
Cemento Portland Puzolánico (CPP)	20	<p>Obras de concreto en masa y armado. Pavimentaciones y cimentaciones. Prefabricación con tratamientos higrotérmicos.</p> <p>Concretos más susceptibles a ataques Por aguas puras, carbónicas agresivas o con débil acidez.</p> <p>Obras de concreto en masas grandes volúmenes (presas, cimentaciones masivas, muros de contención, etc.). Obras en las que se requiera impermeabilidad, a condición de que la dosificación sea la adecuada.</p> <p>Obras de concreto en masa, con áridos Sospechosos de reactividad frente a álcalis.</p> <p>Obras marítimas masivas que no requieran resistencias mecánicas elevadas.</p> <p>Tratamientos hidrotérmicos de higrotérmicos del concreto.</p>	<p>Concreto pretensado con Alambres adherentes</p> <p>Fabricación de concreto en tiempo de heladas</p>	<p>Las normales en la dosificación y en el almacenamiento tratando de que no se prolongue más de tres meses. Curar adecuada y prolongadamente, en especial en climas secos y fríos, evitando desecaciones durante el primer período de endurecimiento, en climas cálidos y secos.</p>
	30, 30 R	<p>Los mismos fines que en el Tipo CPP, Clase Resistente 20. Obras de concreto en masa o armado que toleren un moderado calor de hidratación. Obras de concreto en masa o armado en ambientes ligeramente agresivos por aguas puras, carbónicas o con débil acidez mineral. Obras de concreto en masa o armado con agregados sospechosos de reactividad frente a álcalis. Obras de gran impermeabilidad con dosificaciones adecuadas. Prefabricación con tratamiento hidrotérmicos de higrotérmicos. Obras de concreto pretensado.</p>	<p>Los mismos fines que el Tipo CPP, Clase Resistente 20, excepto concreto pretensado. Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos.</p>	<p>Los mismos fines que el Tipo CPP, Clase Resistente 20, reduciendo el período de almacenamiento a no más de dos meses.</p>

Tabla 3.5 Recomendaciones prácticas para la utilización del Cemento Portland Puzolánico.

El cemento portland compuesto en general, perteneciente a una misma clase resistente, es equivalente desde el punto de vista de utilización práctica, a efectos estructurales. Entre el empleo de unos u otros cementos pueden existir algunas ligeras diferencias, en función de las consistencias o de las relaciones agua / cemento de los concretos.

A efectos de durabilidad, resistencia química (excepto corrosión de armaduras), calor de hidratación, retracción y fisuración, o tratamientos higrotérmicos, y a igualdad de todo lo demás, en principio serán preferibles los cementos portland compuestos a los cementos portland ordinario, a no ser que estos tengan alguna de las características especiales incluidas en las mismas, tales como bajo calor de hidratación y/o resistente a los sulfatos (ver tabla 3.6).

Tipo de Cemento	Clase Resistente	Utilizable para:	No recomendables, salvo precauciones especiales, para:	Precauciones
Cemento Portland Compuesto (CPC)	20	Prácticamente todos los fines de los Tipos CPEG y CPP, de las clases resistentes correspondientes, habida cuenta de que sus propiedades u comportamientos se pueden considerar como suma ponderada, según sea la composición, de las propiedades y comportamientos de dichos tipos de cemento y clases resistentes.	Prácticamente los mismos casos limitativos de los Tipos CPEG y CPP, de las correspondientes clases resistentes, por los mismos motivos.	Prácticamente las mismas que para el resto de los Tipos CPEG y CPP, de las clases Resistentes Correspondientes por razones análogas.
Portland Compuesto (CPP)	30, 30R 40 y 40R	Prácticamente todos los fines de los Tipos CPEG y CPP, ya que sus propiedades y comportamientos se pueden considerar como suma ponderada según las propiedades y comportamientos de dichos tipos de cemento y clases resistentes.	Prácticamente los mismos casos limitativos de los Tipos CPEG y CPP, de las correspondientes clases resistentes, por los mismos motivos.	Prácticamente las mismas que para el resto de los Tipos CPEG y CPP, de las clases Resistentes Correspondientes por razones análogas.

Tabla 3.6 Recomendaciones prácticas para la utilización del Cemento Portland Compuesto.

Capítulo IV

FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO

4.1 Fenomenología.

Al mezclar agua-cemento se produce una mezcla plástica y trabajable, comúnmente llamada "pasta de cemento". Las propiedades de la mezcla permanecen sin cambio por un lapso de tiempo, a este período se le conoce como "período durmiente". Sin embargo existe una etapa donde la pasta endurece al grado de perder su plasticidad y se convierte en quebradiza y no trabajable, Esto es conocido como "fraguado inicial" y el tiempo requerido para que la pasta alcance esta etapa se le conoce como "tiempo de fraguado inicial". Mientras el tiempo de fraguado continua la pasta se va endureciendo hasta convertirse en un sólido rígido, entonces el fraguado final es alcanzado, igualmente el tiempo requerido para que la pasta alcance el fraguado final se conoce como "tiempo de fraguado final". El sólido resultante es conocido como "fraguado del cemento" ó "pasta de cemento endurecida". La pasta endurecida continua ganando resistencia con el tiempo, proceso conocido como "endurecimiento". Estas etapas de fraguado y endurecimiento son esquemáticamente descritos en la figura 4.1

Los tiempos de fraguado inicial y final son de suma importancia, ya que el tiempo de fraguado inicial determina el tiempo requerido para que la mezcla permanezca plástica y trabajable y pueda ser manejada y colocada en el sitio de la construcción. Se especifica un mínimo de 45 min para el fraguado inicial en la mayoría de las normas para el cemento portland ordinario (BS12, ASTM C150). Por otra parte, un máximo de 10 horas es especificado para el tiempo de fraguado final según (BS12) ó 375 mín según (ASTM C150). La necesidad de un máximo es requerido para permitir que en la construcción se pueda continuar trabajando dentro de un tiempo después de colocar y terminar el concreto.

Los tiempos de fraguado del cemento dependen de su finura y composición, y algunos son arbitrariamente determinados en la resistencia a la penetración de la pasta, con una aguja estándar, usando un aparato conocido como aguja vicat (BS 4550, part. 3, ASTM C191). Para determinar el tiempo de fraguado del concreto, en principio es empleado el mismo procedimiento. La resistencia a la penetración es determinada en un mortero, pasando el concreto a través de la malla de 4.75 mm por un aparato diferente conocido como aguja proctor (ASTM C403). Finalmente los tiempos de fraguado se ven afectados por la temperatura ambiente y son usualmente reducidos con una elevación de esta al final. Este efecto específico de la temperatura en los tiempos de fraguado es discutido mas adelante.

4.2 Proceso de Hidratación.

En contacto con el agua el cemento se hidrata, para dar un sólido poroso definido como gel rígido. Generalmente, las reacciones químicas toman lugar ya sea través de una solución o por un mecanismo topoquímico. En el primer caso los componentes se disuelven y producen iones en solución. Los iones se combinan y los productos resultantes se precipitan de la solución. En el segundo caso, la reacción toma lugar en la superficie del sólido sin que sus componentes entren a la solución. En la hidratación del cemento ambos mecanismos están involucrados. Es usualmente aceptado que el mecanismo a través de la solución predomina en las etapas tempranas de la hidratación y donde el mecanismo topoquímico predomina durante las etapas tardías o finales.

Se menciono anteriormente que el cemento no hidratado es un material heterogéneo y por esa misma razón se espera que sus productos de hidratación varíen de acuerdo con la reacción específica de sus componentes. Los productos de hidratación son principalmente hidratos de calcio, aluminio y cal. En este respecto los hidratos de silicato de calcio son por mucho el producto más importante. Estos hidratos son el producto hidratador de la alita y la belita las cuales componen el 70% del cemento. De aquí, el fraguado del cemento consiste principalmente en hidratos de silicato de calcio por lo cual significativamente determina sus propiedades.

Los silicatos de calcio hidratados son pobremente cristalizados y producen un sólido poroso el cual esta echo de partículas en forma coloidal manteniéndose unidas por fuerzas de cohesión, amarre o adhesión química. Cuando se refiere a un sólido como el gel rígido. Los silicatos de calcio hidratados, asumen de tener un promedio aproximado de composición de 3CaO_2 . De cualquier forma su exacta composición y estructura depende de varios factores como el tiempo, agua en el sólido y la temperatura. Consecuentemente para evitar alguna composición en su estructura en particular, es preferible referirse a los hidratos por el termino "silicatos de calcio hidratados". Además, la hidratación de la alita y la belita producen una cantidad considerable de cal (hidróxido de calcio), en un 40% y 18% del total del producto hidratado de la alita y la belita respectivamente. La presencia del hidróxido de calcio en gran cantidad en el fraguado del cemento tiene una importante implicación práctica. Esto hace que la pasta de cemento, como el concreto los hace altamente alcalino (si el ph del agua excede de 12.5), explica por que el concreto de cemento portland es muy vulnerable al ataque de ácidos, a no ser que el concreto se proteja externamente, es inadecuado para el uso en un medio ambiente ácido. Esto es muy importante, ya que la corrosión del acero se inhibe una vez que el ph de su medio ambiente inmediato excede de 9, esto pasa a no ser que el Ca(OH)_2 se carbonicé, por lo tanto el concreto proporciona al acero una protección adecuada contra la corrosión. Este efecto protector del ambiente alcalino es por supuesto muy importante con respecto a la durabilidad de estructuras de concreto reforzado.

La hidratación del cemento produce evolución de calor, llamado calor de hidratación. El calor de hidratación del cemento portland ordinario varia, dependiendo de su composición mineralógica, de 420 a 500 J/g. La relación entre la composición mineralógica, el calor de hidratación y la utilización de esta relación, es para producir cemento portland de bajo calor de hidratación.

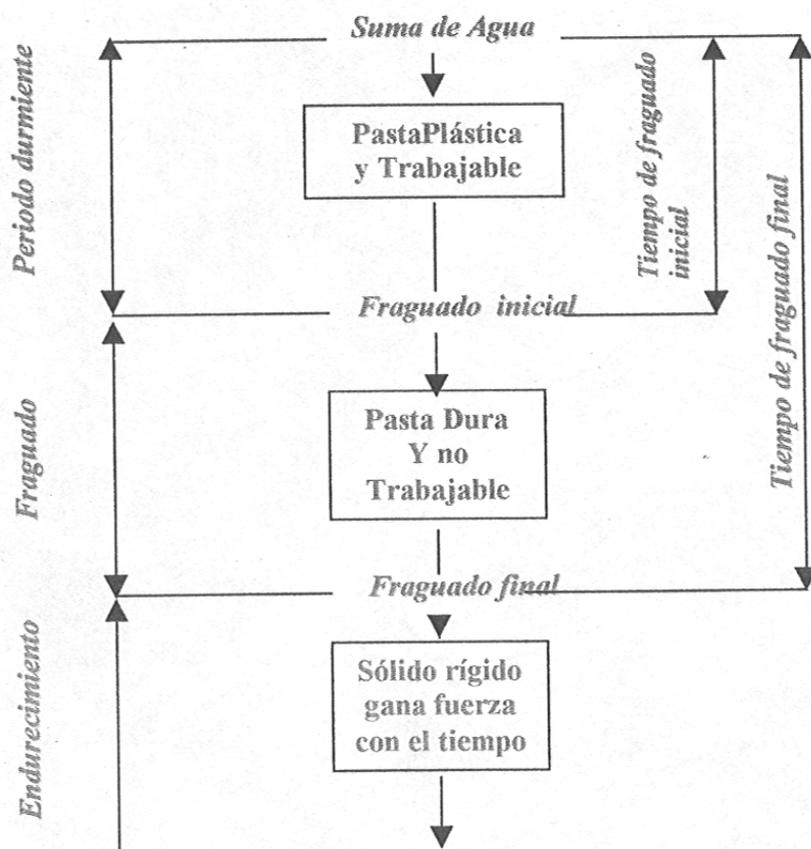


Fig.4.1 Descripción esquemática del fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento.

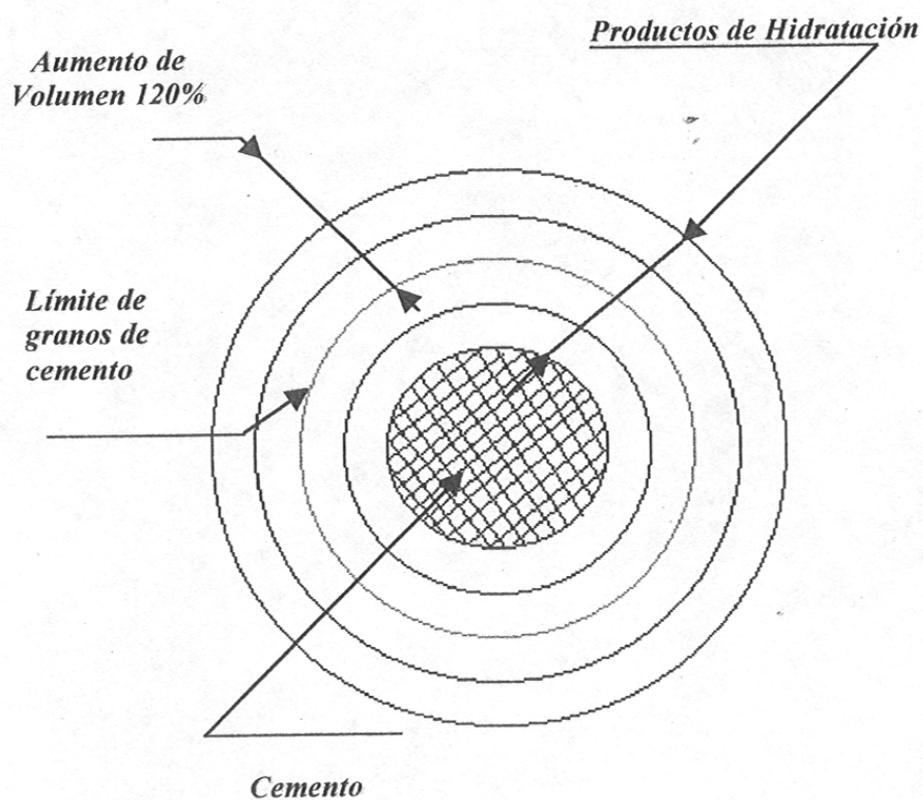


Fig.4.2. Descripción esquemática de la hidratación del grano de cemento

4.3 FORMACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Fue mencionado que a un tiempo tardío las reacciones de hidratación son esencialmente topoquímicas por tal razón toman lugar mayormente en la superficie del cemento. Por consecuencia los productos de hidratación son depositados en la superficie formando una capa densa la cual encapsula los granos de cemento ver figura 4.2. A medida que la hidratación avanza, el espesor de la capa se incrementa y la proporción de hidratación decrece por que es condicional a una gran extensión de la difusión del agua a través de la capa, ver Fig. 4.2. Es de esperarse que después de un tiempo el espesor es alcanzado, el cual impide la difusión del agua y por eso cause que la hidratación cese a pesar de la existencia de una suficiente cantidad de agua. El espesor limitado es mas o menos de 10 :m. Esta conclusión explica al menos una parte, de por que los estándares del cemento impone restricciones en la calidad del cemento usualmente para especificar una mínima área de superficie especifica. Por consecuencia, la medida de los granos de cemento en CPO varían de 5 a 55 :m. La formación estructural de una pasta de cemento hidratado es esquemáticamente descrita en la Fig. 4.4. El volumen total de los productos de hidratación es de 2.2 veces mayor que el volumen de cemento no hidratado Fig. 4.2 y en consecuencia, los espacios entre granos de cemento disminuyen a medida que la hidratación continua.

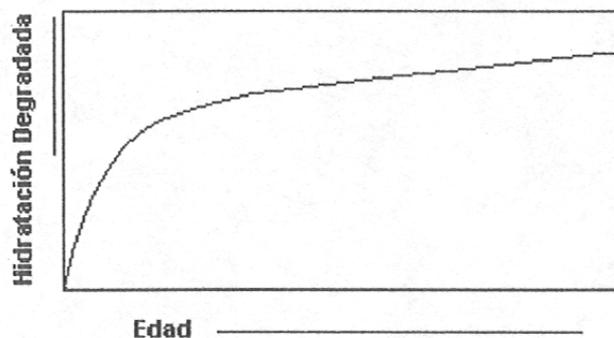


Fig.4.3 Descripción esquemática de la relación entre la hidratación degradada y el tiempo.

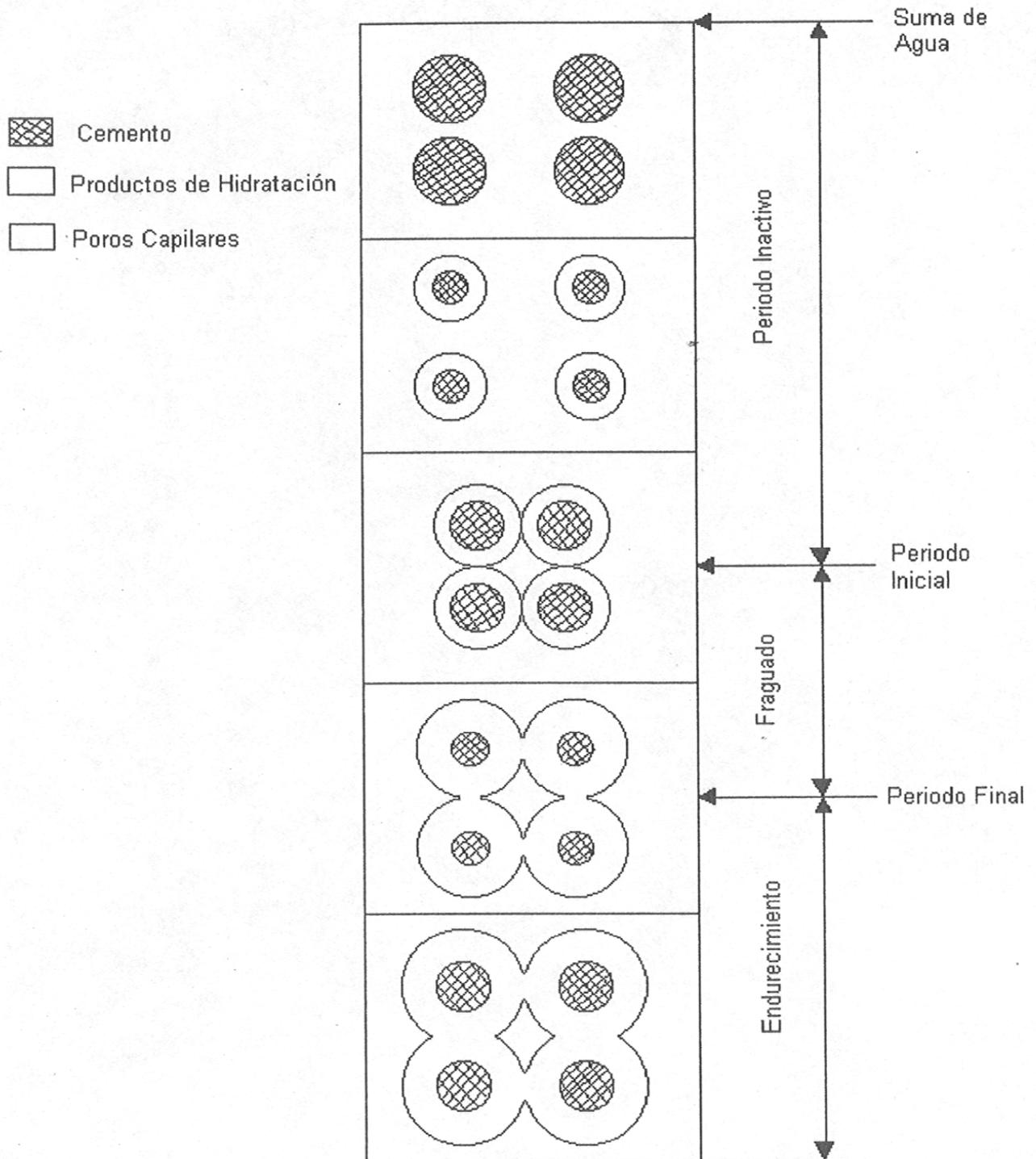


Fig.4.4 Descripción esquemática de la estructura y formación de una pasta de cemento

No obstante, durante algún tiempo, los granos permanecen separados por una película de agua y la pasta entonces retiene su plasticidad y trabajabilidad. A este periodo se le llama periodo durmiente. Durante el período hidratación, el espacio entre los granos de cemento disminuye y se produce una fricción entre los granos hidratados aumentando a tal magnitud que la pasta se pone quebradiza y no trabajable y el fraguado inicial se alcanza. Con la hidratación, las ataduras empiezan a formar puntos al contacto con los granos hidratados y crean continuidad en la estructura de la pasta de cemento. Por consiguiente, la pasta endurece gradualmente y como consecuencia se vuelve un sólido poroso, el fraguado final se alcanza. El sólido resultante es caracterizado por un sistema de poros continuos normalmente conocidos como porosidad del capilar. Si el agua está disponible, la hidratación continúa y la porosidad del capilar disminuye debido a la formación de la suma de productos de la hidratación. Se espera que esta disminución en porosidad produzca un resultado que aumente la fuerza de la pasta de cemento.

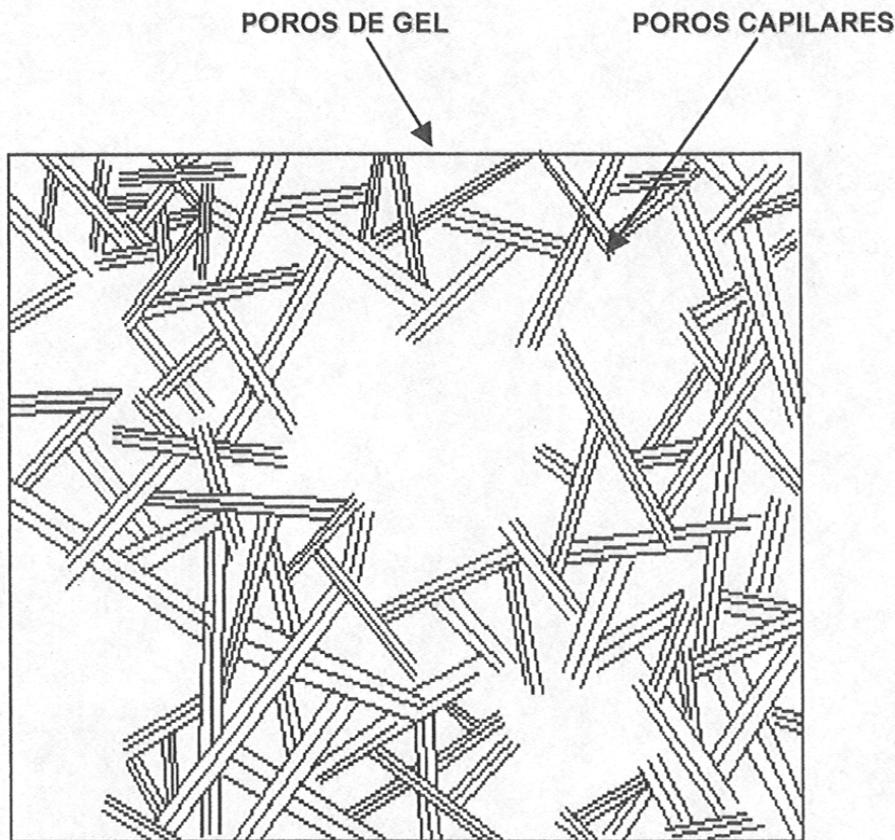


Fig. 4.5 Descripción esquemática de una estructura de gel de cemento



Se menciono anteriormente que los productos de hidratación consisten principalmente en silicatos de calcio hidratados que producen un sólido poroso generalmente llamado gel rígido. Un gel que se compone de partículas sólidas de tamaño coloidal, y su fuerza es determinada por las fuerzas de cohesión que operan entre las partículas. El gel, sin embargo es inestable y se desintegra con la absorción del agua, considerando que el cemento fraguado es muy estable en el agua. Esta característica del cemento fraguado se atribuye a las ligaduras químicas las cuales se forman al contacto con algunos puntos de las partículas del gel, y es que le imparte al gel su rigidez y estabilidad en el agua de aquí la referencia a gel rígido. Los tamaños de las partículas del gel son muy pequeños, de hecho imparten al gel una gran área de la superficie específica que, cuando se mide con el vapor del agua, es de tamaño de $200,000 \text{ m}^2/\text{Kg}$. Las fuerzas de cohesión son propiedad de la superficie, que a tal modo incrementan con la disminución en el tamaño de las partículas o alternativamente con el aumento en el área de la superficie específica. De acuerdo con la fuerza mecánica del cemento, se atribuye en parte, a la gran área de la superficie específica del gel de cemento.

El gel de cemento tiene una porosidad característica de 28%, con el tamaño de los poros del gel que varían entre 20 y 40 micras. Los poros capilares antes mencionados que son los restos de los espacios llenados por el agua que no se llenaron con los productos de la hidratación, son más grandes. Puede comprenderse que el volumen de los poros capilares varían y dependen en primer caso en la relación agua-cemento y como consecuencia en el grado de hidratación. Una descripción esquemática de la estructura del gel de cemento se presenta en la Fig.4.5 en la cual, las partículas del gel son representadas a través de dos o tres línea paralelas para indicar la naturaleza del laminar de su estructura. En una macro escala, no mostrada en la Fig.4.5, algunos granos de cemento deshidratados y cristales de hidróxido de calcio (cal) son encontrados empotrados en el gel de cemento. Vacíos de aire también son introducidos intencionalmente usando agentes inductores de aire, atraídos por el aire atrapado, presentes a lo largo del gel. Por supuesto, debido a la naturaleza porosa de su estructura, el agua es usualmente presente en el fraguado del cemento en una cantidad que varía de acuerdo con las condiciones del medio ambiente. El agua juega un papel muy importante determinado por el comportamiento de la pasta, y es a veces clasificado como sigue:

- (1) El agua se combina con los productos de hidratación y como a tal constituye parte del sólido. Tal agua es llamada químicamente agua liga, agua combinada o agua no evaporable. Este tipo de agua a veces se usa, para determinar el grado de hidratación cuantitativamente.
- (2) El agua que está presente en los poros del gel, es conocida de acuerdo como "agua de gel." Debido al tamaño muy pequeño de los poros del gel, la mayoría del agua del gel es sostenida a través de fuerzas de la superficie y es físicamente considerada como absorción de agua. La movilidad de este tipo de aguas es restringida por fuerzas de la superficie, Esta agua no es químicamente activa.

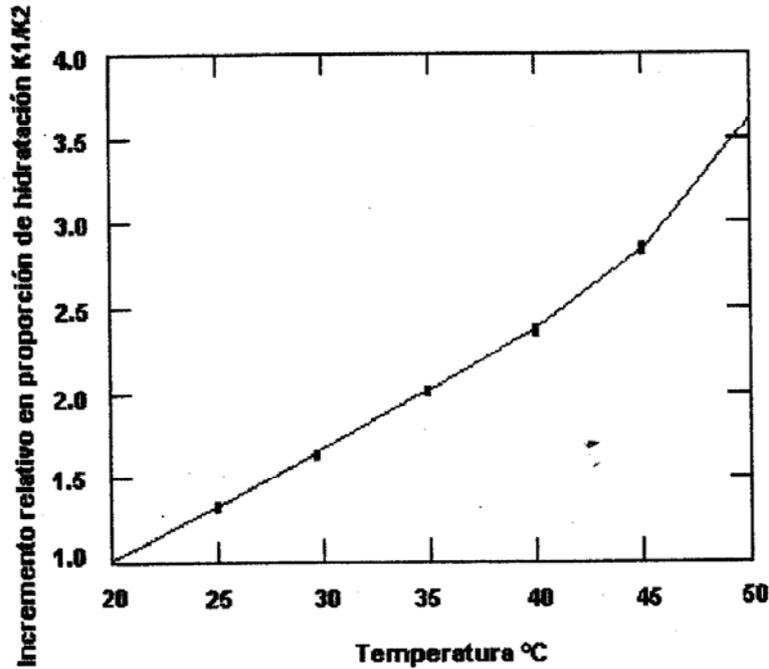


Fig. 4.6 Efectos de la temperatura en la proporción de hidratación del cemento portland en acordancia con la ecuación de Arrhenius.

Este efecto de aceleración de la temperatura es experimentado, en una práctica cotidiana y es apoyado por un cuerpo considerable de datos experimentales. Es claramente demostrado, por ejemplo, en la Fig. 4.7 en la que el grado de hidratación es expresado por la cantidad de agua químicamente ligada. De hecho, este efecto acelerado de la temperatura es conocido y reconocido, y se utiliza ampliamente para acelerar el desarrollo de la resistencia en el concreto.

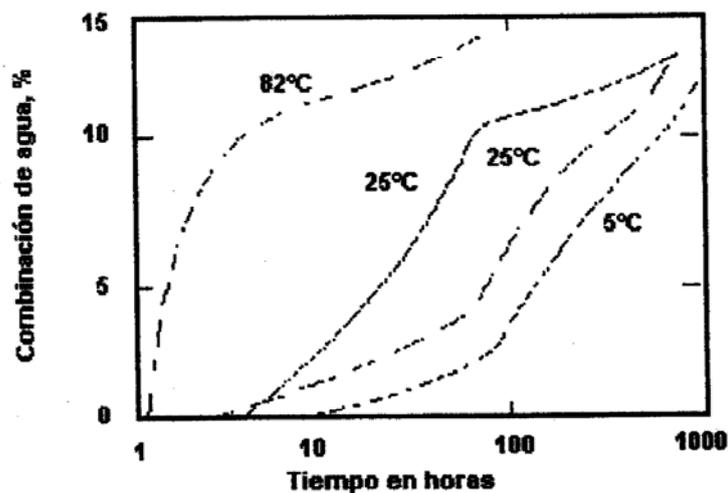


Fig. 4.7 Efectos de la temperatura en las proporciones de hidratación.

4.4.2 Efectos en el Ultimo Grado de Hidratación.

Se explico anteriormente que el ultimo grado de hidratación es determinado por un espesor limitante de la capa de los productos hidratados la cual se forma alrededor de los granos de cemento hidratados. El espesor limitado, depende de la densidad de la capa del gel, y el espesor del último grado de hidratación, se espera que disminuya con el aumento de la densidad del gel, y viceversa. Asumiendo, que la densidad del gel no es significativamente afectada por la temperatura. Se espera que el ultimo grado de hidratación no sea afectado por la temperatura esto se apoya por los datos de la Fig. 4.7 que indica que esencialmente el mismo grado de hidratación se alcanza en pastas de cemento sin tener en cuenta la temperatura del curado. Por otro lado, los datos de la Fig. 4.8 sugieren que el aumento del último grado de hidratación se incrementa con la temperatura mientras que los datos del otro indican lo opuesto, y que el último grado de hidratación disminuye. Esto puede ser discutido en pruebas consideradas, el ultimo grado de hidratación no se alcanza. En todo caso, el efecto de temperatura en el último grado de hidratación es aparentemente pequeño y de importancia práctica limitada.

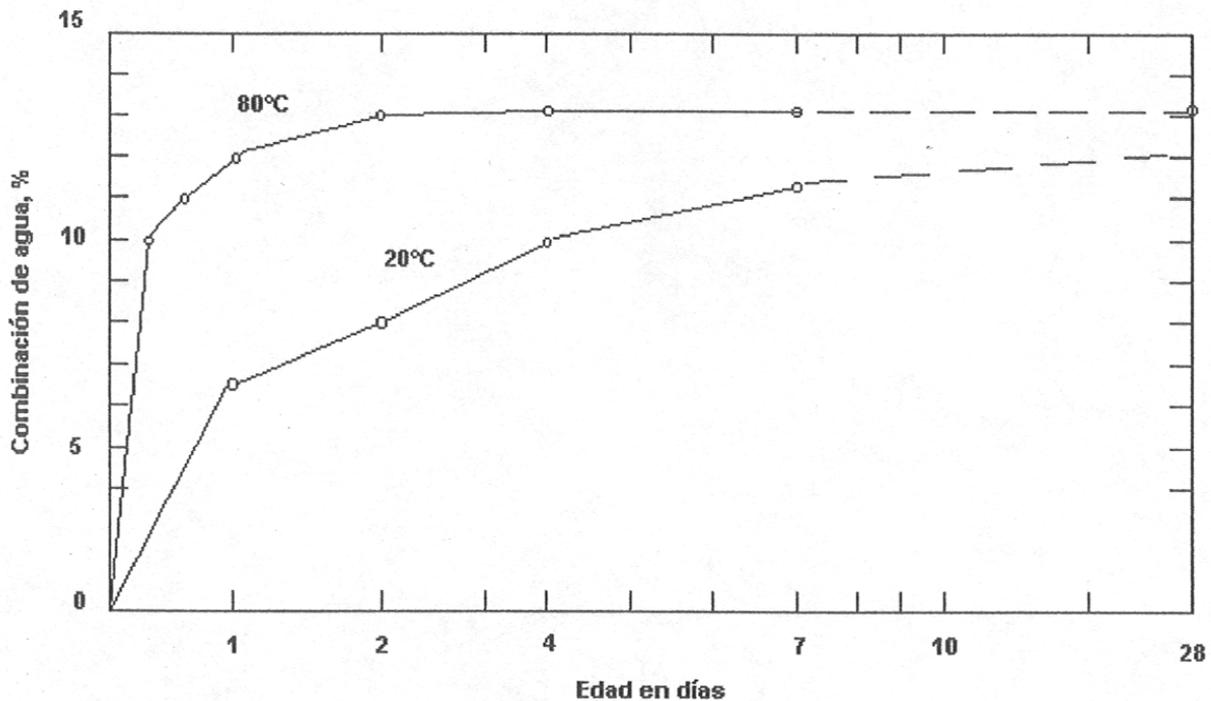


Fig. 4.8 Efectos de la temperatura en el último grado de hidratación.

4.4.3 Efectos en la Naturaleza de los Productos de Hidratación.

Generalmente se acepta el rango de la temperatura arriba de los 100°C, aunque la morfología y micro estructura de los productos de hidratación son algo afectados, en la estequiometría de la hidratación permanece virtualmente el mismo, y los productos de hidratación no difieren esencialmente de esos que se forman a temperaturas moderadas. La similitud en la composición de los productos de hidratación, sin tener en cuenta la temperatura del curado, se apoya un poco por los datos de la Fig. 4.9. el agua combinada y el calor de hidratación miden el grado de hidratación, la observación de la proporción entre las dos constantes restantes implica que al menos el agua químicamente ligada no sufre cambios en su composición. Provocado por el cambio en la temperatura del curado.

Algunos otros datos que relacionan a C_2S (Belita) y C_3S (Alita) en las pastas indican, que la composición de los productos de hidratación son actualmente afectados por las temperaturas del curado, y en la relación de dichas pastas $CaO(cal)$ al $SiO_2(silice)$ fue encontrada para incrementar la relación del agua al $SiO_2(Silice)$, que proporciona una disminución con el aumento de la temperatura en el rango de 25-100°C. En otro estudio se observo un incremento solamente en el rango de 25-65°C pero la tendencia se revertió en los bajos rangos de 4-25°C. En el último estudio se encontró también que el contenido en la hidratación de los polisilicatos contenidos en el hidrato C_3S (Alita), aumento con el tiempo y el aumento en el rango de la temperatura de 4-65°C.

No esta claro que los efectos procedentes de temperatura afecta la actuación en las propiedades mecánicas del fraguado del cemento. En este contexto debe señalarse que las anteriores propiedades son mucho más dependientes de la estructura del fraguado del cemento en lugar de que la composición exacta de los productos de hidratación. Esto sólo es verdad cuando no hay ninguna corrosión química, de otra forma la composición de los productos de hidratación se vuelve muy significativo.

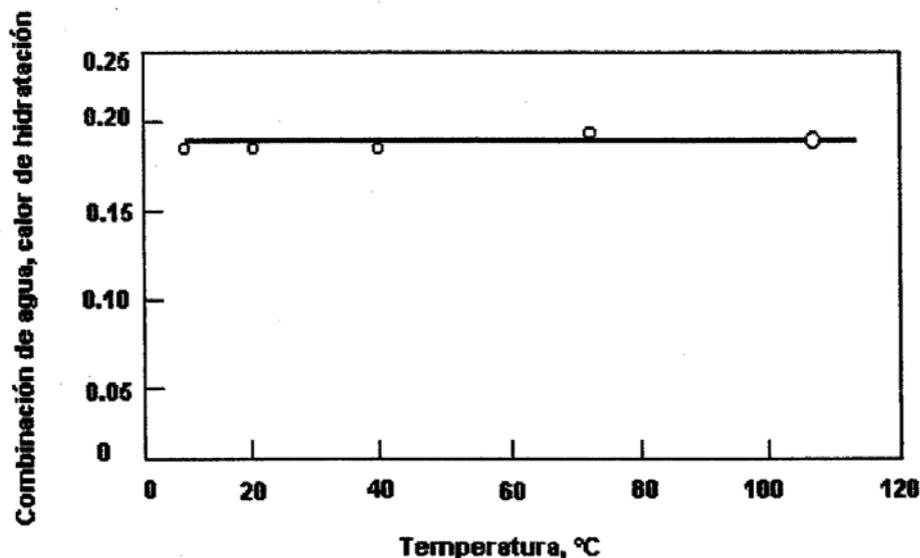


Fig. 4.9 Efectos de la temperatura y la razón de combinación del Agua con el calor de hidratación

4.4.4 Efectos en la Estructura del Gel de Cemento.

La temperatura, a través de su efecto acelerado en la proporción de hidratación, acelera la formación de la estructura del gel. La Temperatura, también afecta la naturaleza de la estructura y, en particular la naturaleza de la estructura del poro. Este efecto es de importancia práctica porque las propiedades mecánicas del concreto, así como su durabilidad, dependen más de las características físicas de la estructura del gel.

En la figura 4.10 se presentan datos del efecto de la temperatura en el área de la superficie específica del gel de cemento. La proporción de agua absorbida del calor de hidratación es equivalente a la proporción del área de la superficie del gel en el contenido de la pasta, esto mide el área de la superficie específica del gel. La última propiedad del gel permanece constante, también implica que el tamaño de las partículas del gel, no son afectadas por la temperatura. La fuerza del gel rígido, como el gel de cemento, depende en gran magnitud, en el tamaño de sus partículas. Si el tamaño de las partículas permanece igual, implica que cualquiera que sea el efecto de temperatura en la resistencia de la pasta de cemento, este efecto no puede atribuirse a los cambios en el área de la superficie específica del gel de cemento. Este aspecto de fuerza se discute después en el texto.

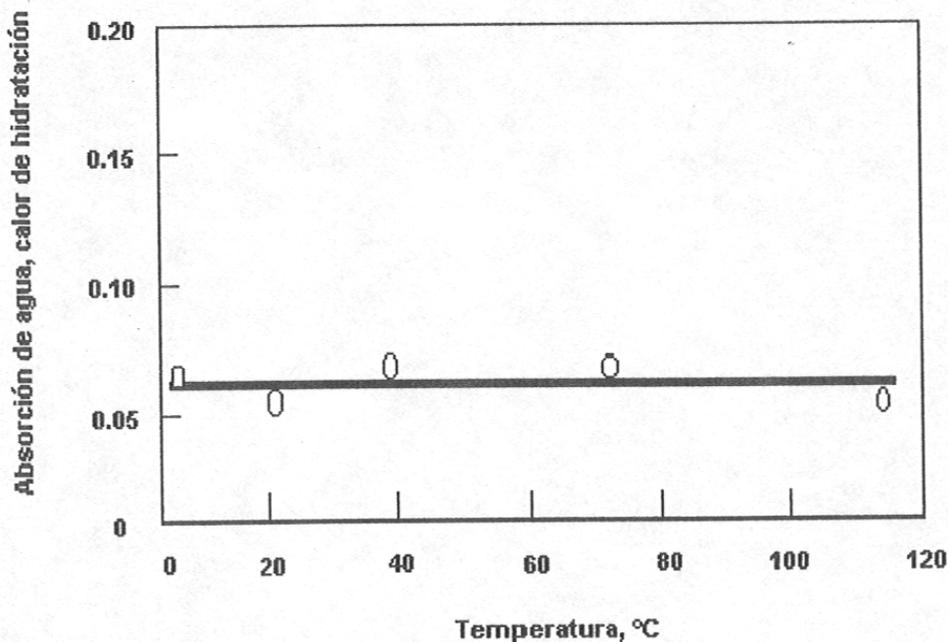


Fig. 4.10 Efecto del curado y la temperatura con proporción y absorción de agua caliente en la hidratación.

Discutiendo la estructura del fraguado del cemento, se explicó que la porosidad disminuye con los beneficios de la hidratación. Como la proporción de hidratación se acelera con la temperatura, la disminución correspondiente en la porosidad es similarmente acelerada. Por consecuencia en un cierto tiempo, la porosidad de una pasta curada a una temperatura más baja será mayor que la porosidad de otra con la misma pasta, curada a una alta temperatura. Puede verse en la Fig.4.11 este caso. A medida que la hidratación procede, este efecto de la temperatura en la porosidad se hace menos evidente, porque el efecto de la temperatura en el último grado de hidratación es pequeño.

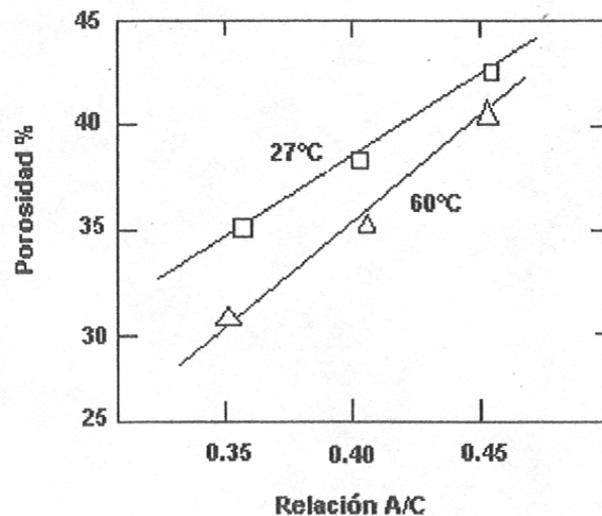


Fig. 4.11. Efecto de la relación A/C y la temperatura en la porosidad total de una pasta de cemento a 28 días.

Por otro lado, la temperatura afecta la distribución en la naturaleza del tamaño del poro en el fraguado del cemento, y una temperatura más alta es normalmente asociada con un sistema áspero. Se demuestra este efecto de temperatura en la Fig. 4.12. Puede verse que, aunque la porosidad total fue más baja en la pasta que se curó a 60°C, el volumen de poros con un radio mayor de 750 Å, fue mayor a la temperatura más alta. Esta es una observación muy importante porque la permeabilidad de las pastas de cemento son principalmente determinadas por el volumen de los poros más grandes en lugar de por su porosidad total. La naturaleza áspera del sistema del poro también puede explicar en parte el efecto adverso de la temperatura en una resistencia retardada.

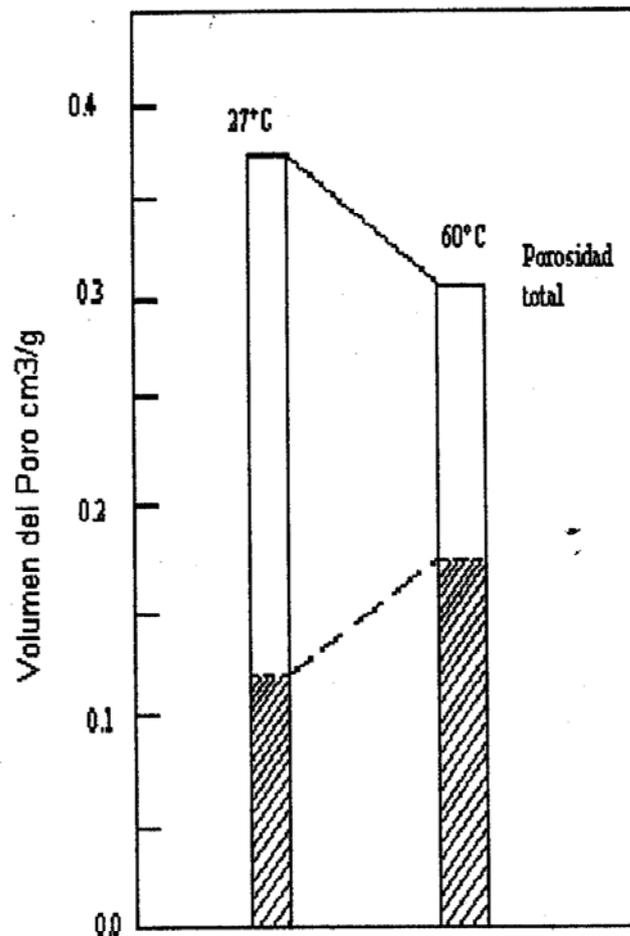


Fig. 4.12. Efecto de la temperatura en la porosidad total y volumen de poros que tienen un radio mayor que 750 Å. (pasta de cemento a 28 días, relación A/C = 0.40).

4.4.5. EFECTOS DE TEMPERATURA---IMPLICACIONES PRACTICAS

El efecto acelerado de la temperatura en proporción a la hidratación se manifiesta con tres implicaciones prácticas que son particularmente para concretos bajo condiciones de clima caliente. Estos incluyen el efecto de reducir la temperatura en el tiempo de fraguado, el efecto acelerado en la proporción de endurecimiento y su incremento en la proporción de temperatura que aumenta dentro del concreto.

4.4.6 Efecto en el Tiempo de Fraguado.

Como resultado de una hidratación acelerada, los tiempos de fraguado iniciales y finales son reducidos con el incremento de la temperatura. Este efecto en la temperatura se demuestra en la Fig. 4.13 en la que los tiempos de fraguado son expresados por la resistencia a la penetración del concreto de acuerdo con la norma ASTM C 403. Este efecto de la temperatura se observa que es más pronunciado en el rango más bajo, que en un rango de temperatura más alto. Puede verse en la (Fig.4.13) que al levantar 14°C en temperaturas de 10 a 24°C reducen el tiempo de fraguado inicial por 8 hrs., mientras que el mismo levantamiento de la temperatura de 24 a 38°C , reduce el último sólo por 5 hrs.

4.4.7 Efecto en la Proporción del Endurecimiento

El incremento en la proporción de hidratación con la temperatura, implica que la combinación del cemento con el agua sea a una proporción más alta. La cantidad de agua libre en la mezcla, por consiguiente, se reduce, llegando al endurecimiento de la mezcla correspondiente a una proporción más alta. Es más, la proporción del endurecimiento es aumentada más allá por el secado intensivo de la mezcla con el aumento de la temperatura del ambiente, particularmente en ambientes secos. Este efecto de la temperatura en la proporción del endurecimiento, se refiere en la tecnología de concretos como pérdidas del revenimiento. Una pérdida de revenimiento acelerada es, por supuesto, indeseable porque reduce la longitud de tiempo durante el cual el concreto fresco permanece trabajable y puede ser manejado en el sitio de la construcción.

De hecho, este fenómeno de pérdida de revenimiento constituye uno de los problemas mayores del concreto en climas-calientes. Sin embargo, para superar los problemas prácticos asociados con la pérdida de revenimiento acelerada, uno o más de los siguientes pasos son empleados:

- (1) Usando una mezcla más húmeda, una mezcla de revenimiento más alta, o aumentando la cantidad de agua en el mezclado o usando mezclas de agua reducidas;
- (2) Bajando la temperatura del concreto usando una mezcla de agua fría o sustituyendo por hielo (arriba de 75%) de la mezcla de agua;
- (3) Retemplando agregando agua o superplastificantes o ambos a la mezcla para restaurar la consistencia inicial del concreto; y
- (4) Colar durante las partes más frescas del día, durante la tarde o por la noche.

4.4.8. Efecto en el Aumento de la Temperatura

El concreto es un conductor de calor pobre, y la proporción de evolución de calor debido a la hidratación del cemento es por consiguiente mayor que la proporción de disipación de calor, por consiguiente se presenta un aumento de temperatura en el concreto. Con el tiempo, el interior del concreto no refresca y se contrae, pero esta contracción es retenida en una mayor o menor magnitud. El resultado de la contracción retenida produce fuerzas tensoras, y este retenimiento puede causar agrietamiento siempre y cuando, la fuerza tensora del concreto en un tiempo considerado sea más baja que las fuerzas inducidas. Un retenimiento externo tiene lugar, por ejemplo, cuando se pone concreto nuevo encima de uno más viejo, y no se da ninguna separación entre los dos. El retenimiento interior siempre ocurre en semi-masas o masas de concreto, porque la temperatura de las capas exteriores del concreto, están más cerca de la temperatura del ambiente, considerando que el centro (interior), es siempre alto. De la contracción térmica del centro (interior), es retenido por las capas exteriores, y la experiencia ha mostrado que cuando la diferencia de temperatura entre el concreto interno y exterior excede, unos 20°C , puede ocurrir agrietamiento. Es implícito, que para eliminar tal agrietamiento el aumento de la temperatura del concreto debe controlarse acordemente. Con este fin varios medios están disponibles, pero estos medios están fuera del alcance de la discusión presente. Puede comprenderse que este problema de agrietamiento térmico se agrava más con el efecto de la aceleración de la temperatura en proporción de la hidratación. Este efecto resulta en una proporción más alta de evolución de calor lo cual provoca un aumento alto en la temperatura del concreto. El incremento de la temperatura del concreto se demuestra en la Fig. 4.13. El aumento de la evolución de calor con la temperatura en una pasta C_3S se muestra en la Fig. 4.14, y el aumento en la temperatura del concreto en la Fig. 4.15.

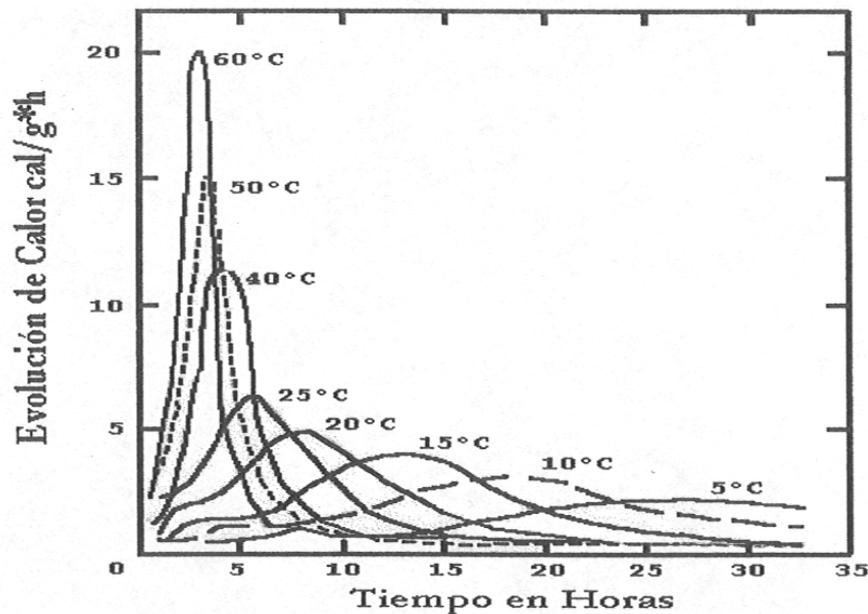


Fig. 4.14 Efecto de la temperatura en en la evolución de calor, en la hidratación del C_3S .

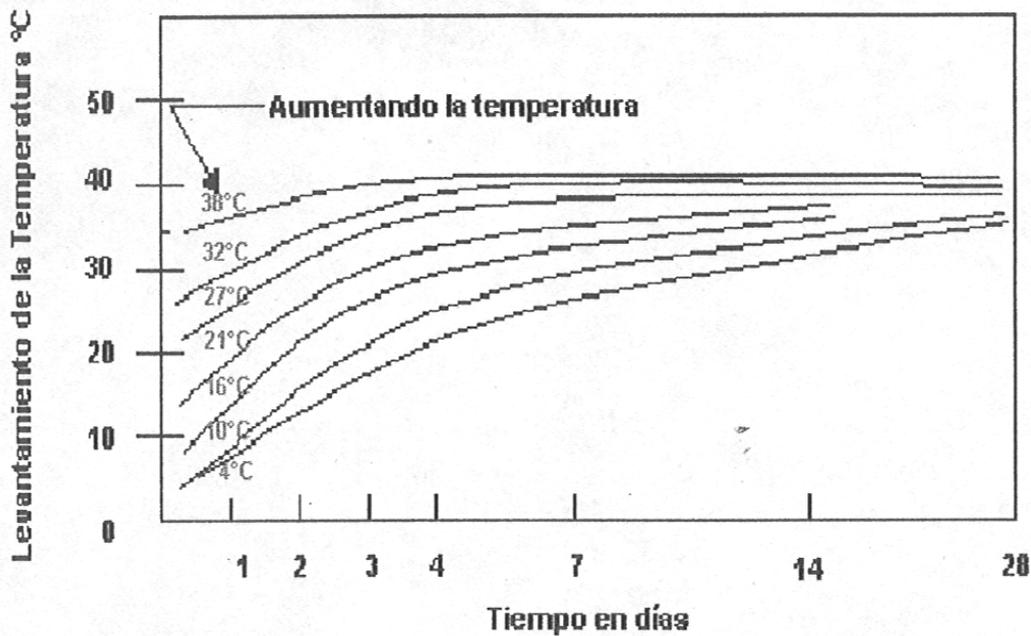


Fig.4.15. Efecto del aumento de la temperatura en una masa de concreto que contiene 223 kg/m³ de cemento tipo I.

4.5. RESUMEN CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.

El cemento mezclado con el agua produce una masa plástica, y trabajable, conocida como pasta de cemento. Las propiedades de la mezcla permanecen inalteradas durante algún tiempo, pero en una cierta fase endurecen y se ponen quebradizas y no trabajables. Esta fase es conocida como fraguado inicial. El periodo del fraguado continua, y la pasta sigue endureciendo hasta que se vuelve un sólido rígido, y se alcanza el fraguado final. El sólido resultante continúa endureciendo y gana fuerza con el tiempo, un proceso que es conocido como endurecimiento.

El fraguado y el endurecimiento son provocados por la hidratación del cemento. Los productos de la hidratación son principalmente silicatos de calcio hidratados y cal, el resto son aluminatos y ferritas. La pasta de cemento endurecida es un sólido heterogéneo que consiste en una masa aparentemente amorfa que contiene cristales de hidróxido de calcio, granos de cemento deshidratados y vacíos, conteniendo agua, aire o ambos. La masa amorfa es un gel rígido hecho de partículas de tamaño coloidal de hidratos de silicatos de calcio y tienen una porosidad fina característica de un 28% y una gran área de superficie específica. Poros mucho más grandes que son los restos del agua original, que no se han llenado por los productos de la hidratación, también están presentes en el gel y son conocido como poros capilares. El volumen de los poros capilares decrece a medida que la hidratación continua esto es por que el volumen de productos de hidratación es 2.2 veces mas grande que el volumen de cemento anhídrido reactivo. La disminución en porosidad provoca un aumento correspondiente de fuerza.

La hidratación aumenta con la temperatura. Por consiguiente, la proporción del endurecimiento del concreto (pérdida de revenimiento) se acelera, sus tiempos de fraguado inicial y final son reducidos, y la temperatura del concreto se incrementa. Puede concluirse que en climas calientes, el uso del cemento de bajo calor es preferible y el uso de cementos de rápido endurecimiento deberá ser evitado. Esta conclusión se observa en la Fig. 4.16 que indica que la temperatura dentro de un concreto hecho con cementos de rápido endurecimiento (tipo III) puede ser unos 20°C más alto que la del interior en un concreto hecho con cemento de bajo calor (tipo IV).

El calor de hidratación de los cementos mezclados, se hace de escoria granulada en alto horno, el fly-ash o la puzolana, son más bajos que el calor del CPO. El aumento de la temperatura en el concreto hecho de cementos, es más baja que el aumento de la temperatura en concretos hechos con CPO. Por lo tanto, desde este punto de vista, el uso de cementos mezclados puede ser considerado deseable en condiciones de clima caliente.

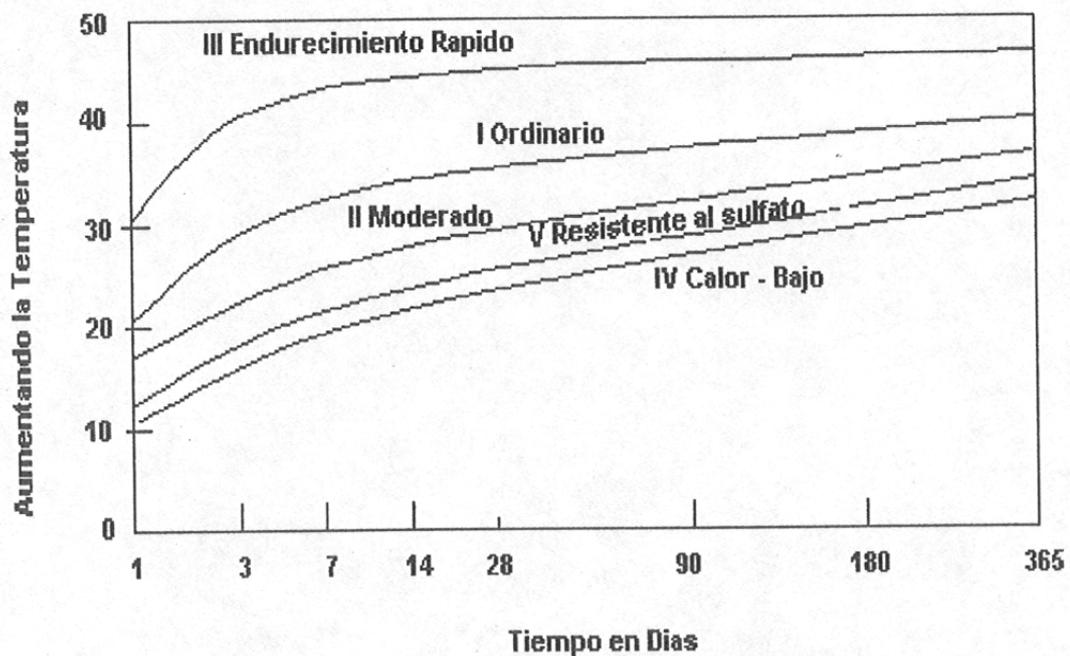


Fig. 4.16. Aumentando la temperatura de un concreto de masa 223 kg/m^3 hecho con cemento de diferentes tipos.

Capítulo V

AGREGADOS MINERALES Y MEZCLADO DE CEMENTOS.

5.1 AGREGADOS MINERALES.

Los agregados por definición es material que aparte de agua, agregados, cemento hidráulico y fibra reforzable, son usados como un ingrediente del concreto o mortero son agregados a la revoltura antes o durante la mezcla. La siguiente presentación esta limitada a ser llamada "agregados minerales" donde otro grupo de agregados son llamados "agregados químicos". El término de agregados minerales no es siempre aceptado y el termino adición a cambio de agregados es sugerido, el término adiciones de minerales fue definido para incluir materiales que están mezclados o entrelazados con los cementos portland, en cantidades que exceden un 5% del peso del cemento, y no sólo aquellos que se adhieren directamente al concreto antes o durante el mezclado. Por otro lado, el término adición es definido como un material que es entrelazado o mezclado en cantidades limitadas por cemento hidráulico o como "proceso de adición" para ayudar a la fabricación y manejo del cemento, o como una "adición funcional" para modificar las propiedades usadas del producto terminado (ASTMC219).

Generalmente los agregados minerales son sólidos finamente divididos, que al adherirlos a una mezcla de concreto en cantidades comparativamente grandes (exceden un 15% del peso del cemento) principalmente para mejorar la trabajabilidad del concreto fresco y su durabilidad, y a veces también su resistencia en su estado de endurecimiento. Se verá después que estos materiales también se usan como reemplazo parcial del cemento portland, en la producción de cementos mezclados. Los agregados minerales pueden ser subdivididos dentro de una baja actividad puzolánica y agregados cementantes.

5.2 Agregados de Baja Actividad.

Este tipo de agregado, a veces se refiere a rellenos inertes, que apenas reaccionan con el agua o el cemento y su efecto tiene una naturaleza física. La caliza fina de tierra o dolomítea, por ejemplo constituye ciertos agregados, y su uso puede ser beneficioso al mejorar la trabajabilidad y la coherencia de las mezclas de concreto que son deficientes en finos. El uso de agregados de baja actividad sólo se practica a una magnitud muy limitada, y no es de ninguna ventaja su uso en ambientes calientes.

5.3 Agregados Puzolánicos.

5.3.1 Actividad de las Puzolanas

Los agregados puzolanicos o puzolanas, contienen sílice reactivo (SiO_2), y a veces también alúmina (Al_2O_3), que en presencia del agua, reaccionan con la cal (Ca(OH)_2) y produce un gel de hidrato de silicato de calcio (gel de SCH), similar a ese es el producido por la hidratación del cemento portland. Las puzolanas son silíceas o materiales aluminosos que en sí mismos tienen poco o ningún valor cementante, pero que finamente divididos y en presencia de la humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a la temperatura ambiente para formar compuestos que poseen propiedades cementantes. Se dice que tal material exhibe una actividad puzolánica y las reacciones químicas involucradas son conocidas como reacciones de puzolanicos.

En la hidratación del cemento portland, una cantidad considerable de hidróxido de calcio es producido en mezclas hechas de puzolanas y de cementos portland, una reacción puzolánica tomara lugar debido a la disponibilidad de la cal. Esta disponibilidad de cal facilita el reemplazo de una parte del cemento portland por puzolanas y explica por que este agregado puede usarse para producir mezclas de cemento puzolánico.

5.3.2 Clasificación de las Puzolanas.

Las puzolanas pueden subdividirse en naturales (crudas o calcinadas) y artificiales (subproductos industriales). La formación son naturalmente de materiales y su proceso esta limitado a moler, aplastar y cribar. Estos materiales que incluyen cenizas volcánicas y lava son conocidas como puzolanas naturales. Otro tipo de puzolana natural es la tierra diatomácea, una tierra que está principalmente compuesta de esqueletos silíceos diatomáceos depositados desde el agua fresca o agua del mar.

Las arcillas encontradas naturalmente no exhiben propiedades puzolanas. Sin embargo, cuando el calor esta en un rango de temperatura de $600-900^\circ\text{C}$, tales materiales se vuelven puzolanicos y esto se refiere al cocido o puzolanas calcinadas. Las anteriores son ahora puzolanas artificiales, pero normalmente ellas se agrupan junto con las puzolanas naturales. Como se mencionó anteriormente, otro grupo de puzolanas son materiales subproducto de algún proceso industrial. Los materiales más comunes en este grupo; son el *Fly-ash* pulverizado (PFA) y el humo de sílice condensado (HSC).

5.4 *Fly-ash Pulverizado (FAP).*

El carbón contiene algunas impurezas como arcillas, cuarzo, etc. que durante la combustión del carbón, se funden y se solidifican en partículas esféricas vítreas. La mayoría de las partículas se acarrearán lejos por el flujo de gas y después se reúnen por precipitatorios electrostáticos. Esta parte de la ceniza es conocida como *fly-ash*. La parte restante de la ceniza se aglomera para dar lo que se conoce como ceniza de fondo. Generalmente el *fly-ash* consiste principalmente en vidrio y silicato que en su mayoría contiene calcio, aluminio y álcalis principalmente. La composición exacta, y las propiedades resultantes del *fly-ash* pueden variar considerablemente, y en este aspecto el contenido de cal es muy importante. De acuerdo con los tipos de *fly-ash* se subdividen en dos grupos: *fly-ash* bajos en calcio (volumen de cal menos del 10%), y *fly-ash* altos en calcio (volumen de cal mayor del 10%, normalmente entre un 15 y 35%). Esta diferencia en contenido de cal se refleja en las propiedades de los *fly-ash*. Considerando por ejemplo, *fly-ash* altos en calcio normalmente son puzolanas y cementantes, los *fly-ash* bajos en calcio son sólo puzolanicos.

La ASTM C 618 clasifica al *fly-ash* de acuerdo con su origen, llamándolo clase F y se refiere a *fly-ash* que se produce de carbón bituminoso, y clase C se refiere a *fly-ash* que se produce de carbón sub-bituminoso. Normalmente el contenido de cal en el *fly-ash*, clase C, es mayor del 10%, y de clase F es más bajo. Es decir, la clasificación dentro del *fly-ash* de bajo calcio y *fly-ash* de alto calcio es idéntica al de ASTM C 618 dentro de las clases F y C. Además del contenido de cal, las propiedades del *fly-ash* son determinados por el tamaño de sus partículas y el contenido de carbón.

El contenido de carbón es medido por la pérdida de ignición. La presencia de carbón en los *fly-ash* no es deseable, principalmente porque aumenta la demanda de agua debido al área de su superficie específica. Es decir, entre más alto sea el contenido de carbón, mayor será el contenido de agua que se requiere para impartir una cierta consistencia. Un incremento en la cantidad de agua afecta las propiedades del concreto y por eso se explica el máximo impuesto por las normas en el requerimiento de agua.

5.5 *Humo de Sílice Condensado (HSC).*

El humo de sílice condensado o simplemente microsíllica o humo de sílice, es un producto sumamente fino del producto de silicón de metal y el ferro silicón de impurezas industriales, consistiendo principalmente en partículas de sílice amorfo (SiO_2). El silicón de metal es producido reduciendo cuarzo por carbón a una temperatura aproximada de 2000°C .

La reducción del cuarzo no se completa, y un poco de gas de SiO se produce. Parte de este gas escapa al aire, se oxida por el sílice y por último se condensa en partículas esféricas de sílice muy pequeñas. Las propiedades más notables de la microsilica es el tamaño pequeño de sus partículas y el alto contenido de sílice. El tamaño del diámetro promedio de las partículas de microsilica es cerca de 0-1 micras, produciendo una área de su superficie específica muy alta de unos 20 000 m²/Kg. El tamaño de las partículas de microsilica es dos veces la magnitud pequeña del tamaño de las partículas de cemento (tamaño aproximado 10 micras) o de las partículas del *fly-ash*. El contenido de sílice depende del tipo de metal que se produce y varía de un 84 a un 98%.

La alta área de superficie específica combinada con el alto contenido de sílice, acelera las reacciones puzolánicas y por esto el acelerado desarrollo de fuerza. Además el tamaño diminuto de las partículas de humo de sílice produce un efecto de relleno en la pasta de cemento. Este efecto de relleno es esquemáticamente descrito en Fig. 5.1. Al mezclar con agua y para la misma agua la proporción de sólidos, la porosidad inicial (el volumen fraccionario ocupado por el agua) es el mismo en ambos sistemas considerados. Las pequeñas partículas de humo de sílice rápidamente llenan los espacios entre los granos de cemento y por eso se reduce el espacio entre los sólidos. De la hidratación subsecuente, el resultado de los poros capilares en el contenido de humo de sílice son más finos que los poros en la pasta de cemento. En un sistema de poros capilares más refinados se incorpora humo de sílice en las mezclas de concreto.

Mezcla de Cemento y Agregados Minerales

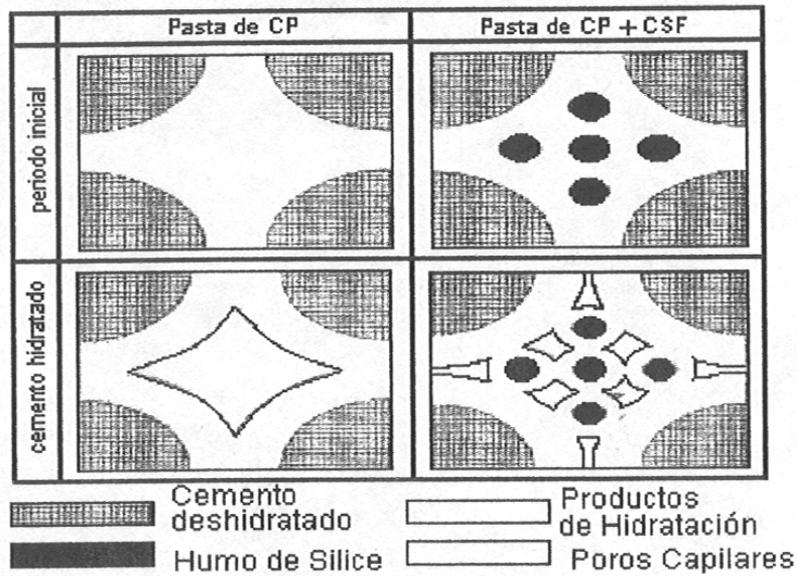


Fig. 5.1. Refinamiento del sistema del poro en una pasta de cemento debido el efecto del relleno de humo de sílice.

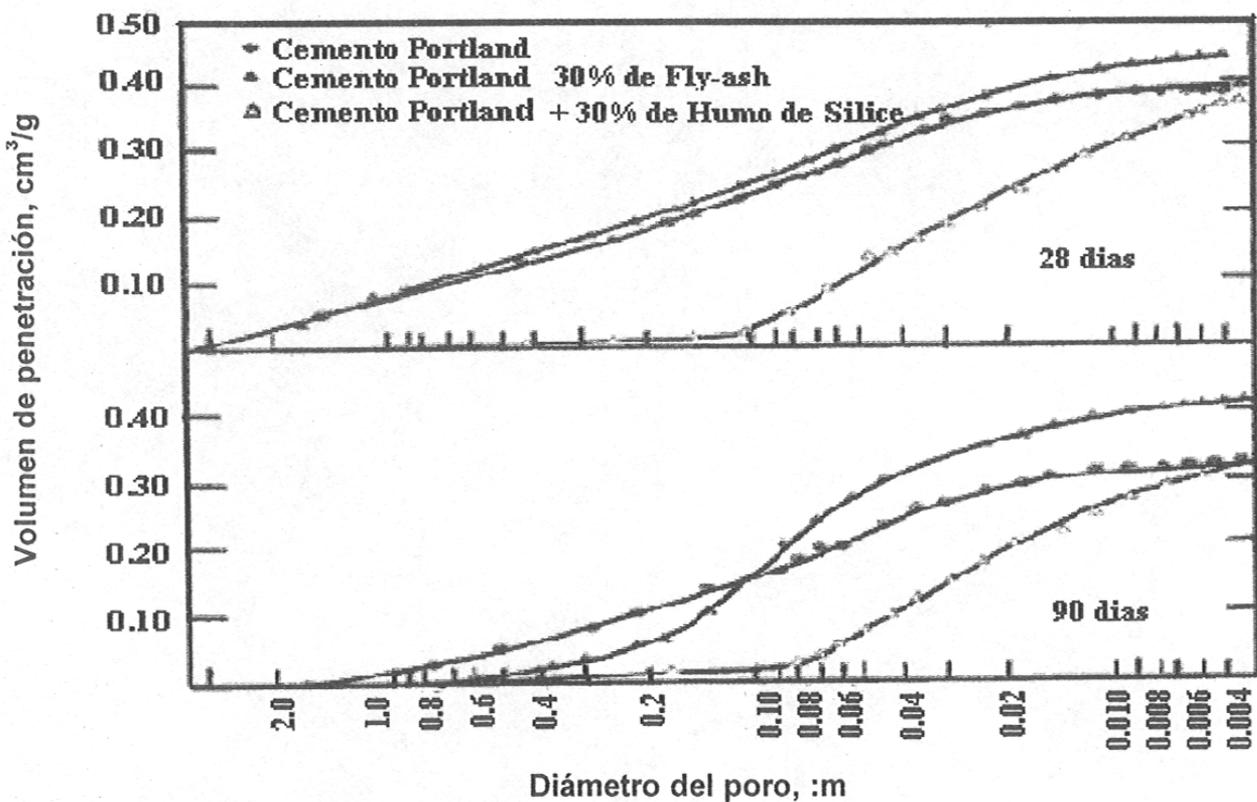


Fig. 5.2. Efecto de reemplazar 30% del cemento Portland (por volumen absoluto), con humo de sílice, o fly-ash, el tamaño del poro y la distribución de la pasta de cemento a las edades de 28 y 90 días.

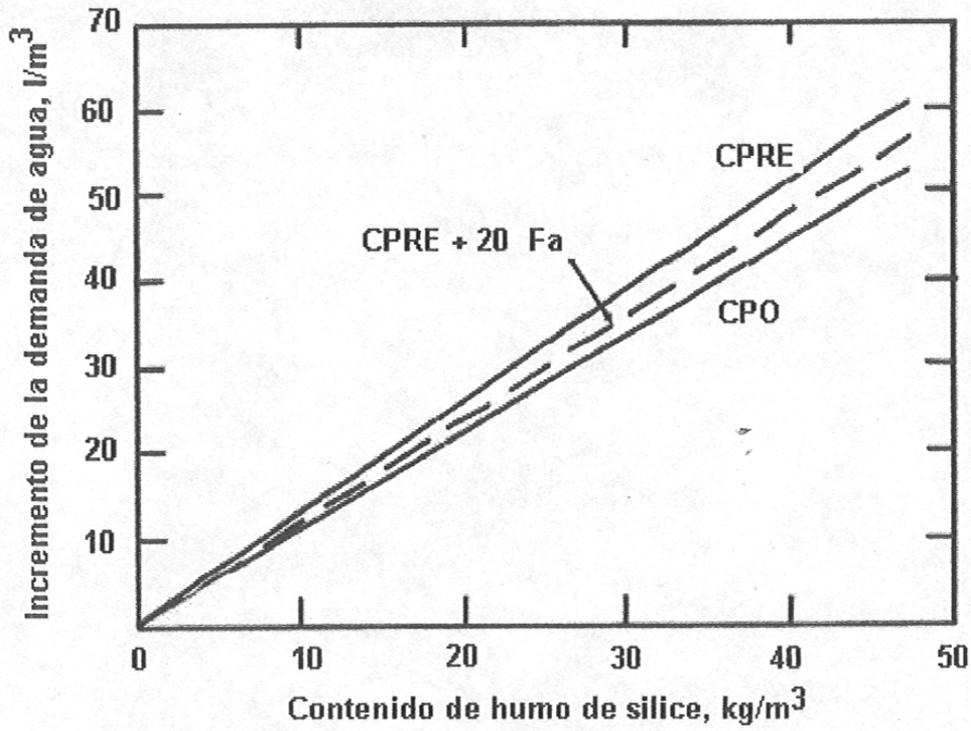


Fig. 5.3. Efecto del contenido de humo de sílice en la demanda de agua del concreto sin un agente reductor de agua.

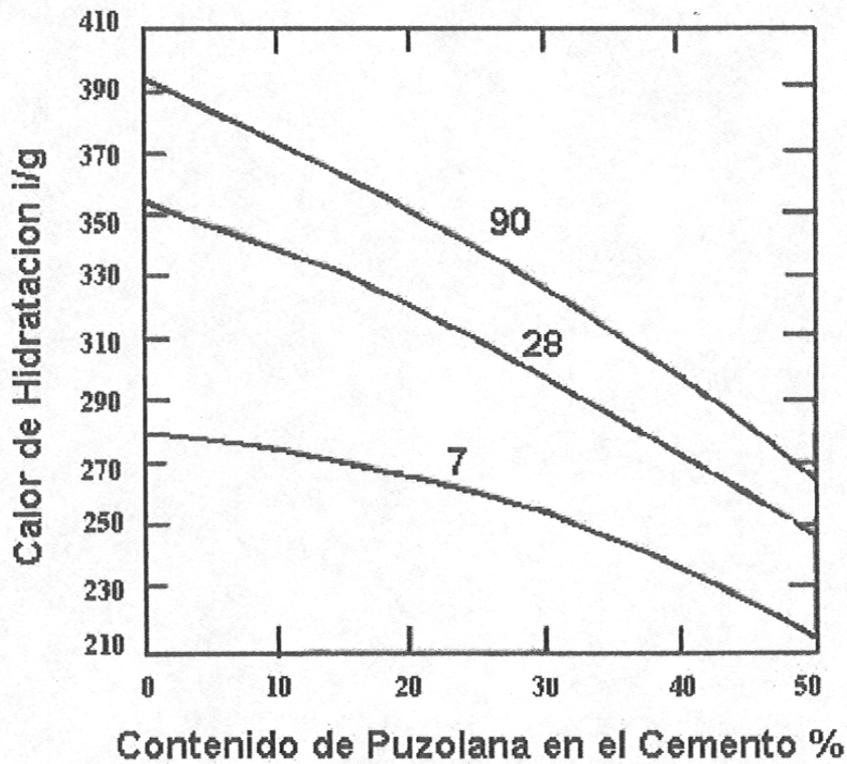


Fig. 5.4. Efecto de reemplazo parcial del cemento portland con una puzolana natural italiana, en el calor de hidratación del cemento.

5.6 Calor de hidratación.

Se sabe que al hidratar cementos portland, las reacciones de las puzolanas producen la liberación de calor. La liberación de calor debido a las últimas reacciones es menor que la liberación debido al hidratar cemento portland y la proporción de reacciones puzolánicas son menores que las reacciones en la hidratación del cemento portland. El reemplazo de parte del cemento portland con una porción de puzolana da como resultado un cemento bajo en calor de hidratación, y la reducción de calor de hidratación aumentara con el incremento en el porcentaje de cemento portland reemplazado por puzolana. Los datos presentados en la Fig. 5.4, relacionan una puzolana natural italiana, claramente confirma estos efectos de agregados puzolánicos en el calor de hidratación del cemento. Estos efectos se observan en la Fig. 5.5, en la que el cemento portland fue reemplazado en parte por *fly-ash* (parte A) y humo de sílice condensado (parte B). Puede concluirse que el reemplazo parcial de cemento portland con agregado puzolánico, produce un cemento de calor más bajo de hidratación, y que semejante cemento puede usarse en lugar del cemento portland de bajo calor.

La alta área de la superficie específica del humo de sílice incrementa la proporción de las reacciones puzolánicas y por eso el resultado en los aumentos en la proporción de evolución de calor. El calor de hidratación de un cemento que contiene humo de sílice puede ser más alto que el que contiene *fly-ash*, y, quizás, tan alto o aun más alto que el calor de hidratación del cemento portland. Este efecto es confirmado por los datos de la figura 5.6 pero no por la 5.5 donde el humo de sílice fue encontrada para reducir el calor de hidratación del cemento y los efectos del humo de sílice y *fly-ash* fueron los mismos.

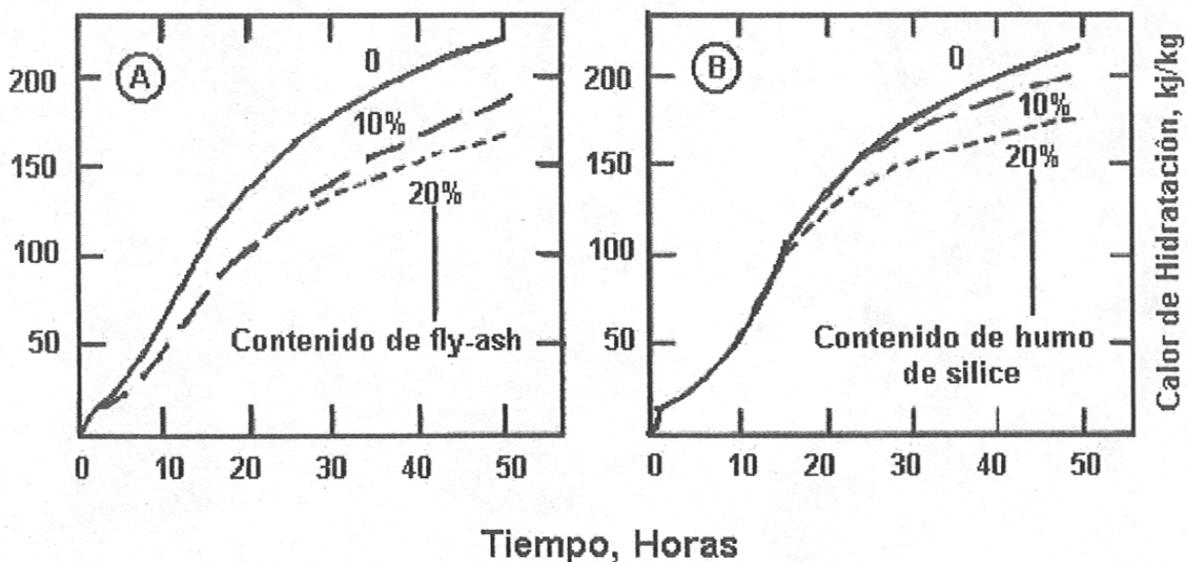


Fig. 5.5. Efecto de remplazamiento parcial de cemento portland con *fly-ash* (parte A), y humo de sílice condensado (parte B), en el calor de hidratación del cemento (pastas de cemento, agua y una proporción de sólidos = 0-5).

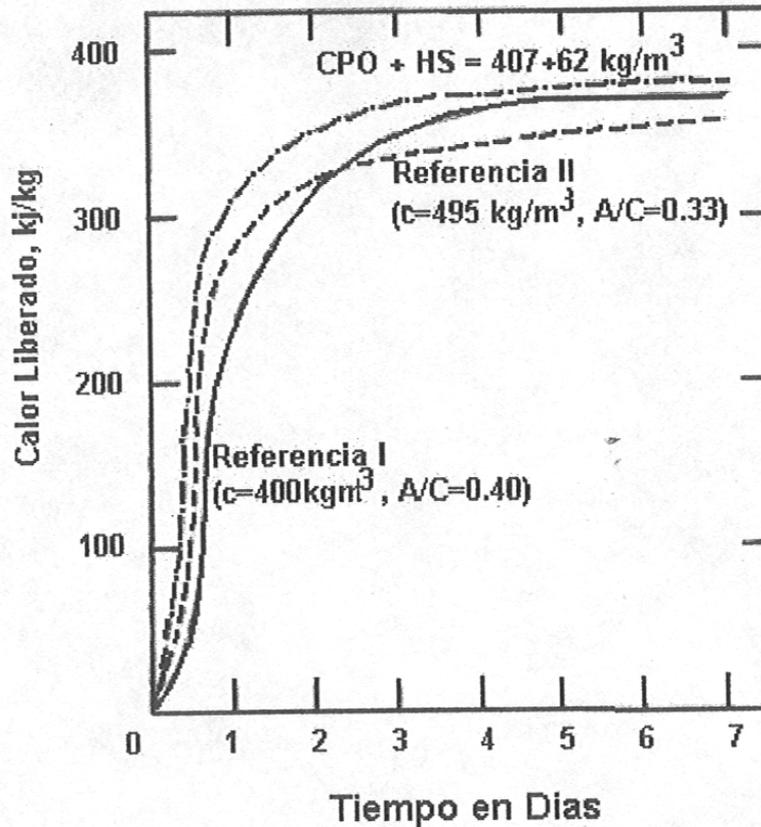


Fig. 5.6. Efecto de reemplazo parcial del cemento portland con humo de sílice condensado en el calor de hidratación del cemento.

5.7 Efecto sobre la Microestructura.

El reemplazo de cemento portland con humo de sílice resulta en un sistema de poro más fino (Fig. 5.2). Este efecto de humo de sílice es atribuible al efecto de relleno con partículas pequeñas de humo de sílice (Fig. 5.1). Este efecto no se espera con las puzolanas que se caracterizan con un tamaño de partículas similares a las del cemento portland. El efecto de reemplazar cemento portland con *fly-ash* en distribución del tamaño del poro también se presenta en la Fig.5.2.

Puede verse que a la edad de 28 días, la pasta de *fly-ash* exhibió una porosidad algo mayor que la del cemento portland natural, pero la distribución del tamaño del poro de las dos pastas es esencialmente el mismo. A la edad de 90 días, la porosidad de la pasta del *fly-ash* permanecía más alta que la pasta del cemento portland, su sistema de vacío mas fino. Normalmente se acepta que el uso del *fly-ash* es asociado con un sistema de poros más finos, pero no es necesaria una porosidad más baja. Puede comprenderse que el sistema del poro más fino se refleja con una permeabilidad más baja, proporcionándole al concreto un adecuado curado.

5.7.1 *Contenido de Hidróxido de calcio y el pH en el poro de agua.*

El consumo de hidróxido de calcio debido a las reacciones de la puzolana es de suma importancia cuando la posible corrosión del acero de refuerzo en el concreto es considerada. La presencia de hidróxido de calcio imparte al poro de agua de la pasta de cemento un alto pH con valor de 12.5, y esta alta alcalinidad protege el acero de refuerzo contra la corrosión. Esta protección se pierde una vez que el pH del poro del agua decae a 9 y esto puede ser cuestionado que dicha caída ocurre debido al consumo de hidróxido de calcio por reacciones puzolánicas. Es decir, el uso de agregados puzolánicos deberá evitarse, o incluso prohibirse en concretos reforzados. Sin embargo, en esta fase, se señala que las reacciones de las puzolanas sólo bajan ligeramente los valores del pH del poro de agua. Este efecto se demuestra, por ejemplo, en la Fig. 5.7 la cual relaciona las pruebas en las cuales 15, 25 y 35% de cemento portland fue reemplazado por dos tipos de fly-ash clase F. Puede verse que a la edad de 150 días, y cuando el *fly-ash* reemplaza un 35% del cemento, el contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es reducido por un factor mayor de 2, considerando que los valores del pH de los poros de agua caen ligeramente de 12.97 a 12.72. Se presenta una reducción por otros cuando el 30% del cemento fue reemplazado por fly-ash Fig. 5.9. Una significativa reducción en el nivel de pH se observó cuando se usó humo de sílice para reemplazar el cemento, y particularmente cuando el contenido de humo de sílice fue de 30% (Fig. 5.8). Sin embargo, cuando se consideró el contenido más práctico de 10%, la reducción del nivel del pH permanece sin cambio.

5.7.2 *Desarrollo de Resistencia.*

El desarrollo de resistencia con el tiempo es provocado por la hidratación del cemento a medida que la hidratación continua, la porosidad de la pasta de cemento disminuye.

Similarmente la resistencia aumenta a medida que las reacciones puzolánicas continúan. Las reacciones puzolánicas son normalmente más lentas que la hidratación del cemento portland y, por consiguiente, la resistencia desarrollada de la mezcla de puzolana-cemento portland es más baja que la resistencia desarrollada de equivalentes no mezclados. Con la excepción de mezclas en las que el humo de sílice sea usado, la resistencia temprana (para las primeras semanas o para después) de concretos hechos con contenido de cemento puzolana es menor que la resistencia de concretos hechos con cementos portland ordinarios no mezclados Fig.5.9, y entre más alto sea el contenido de puzolana, mayor será la reducción de una resistencia temprana.

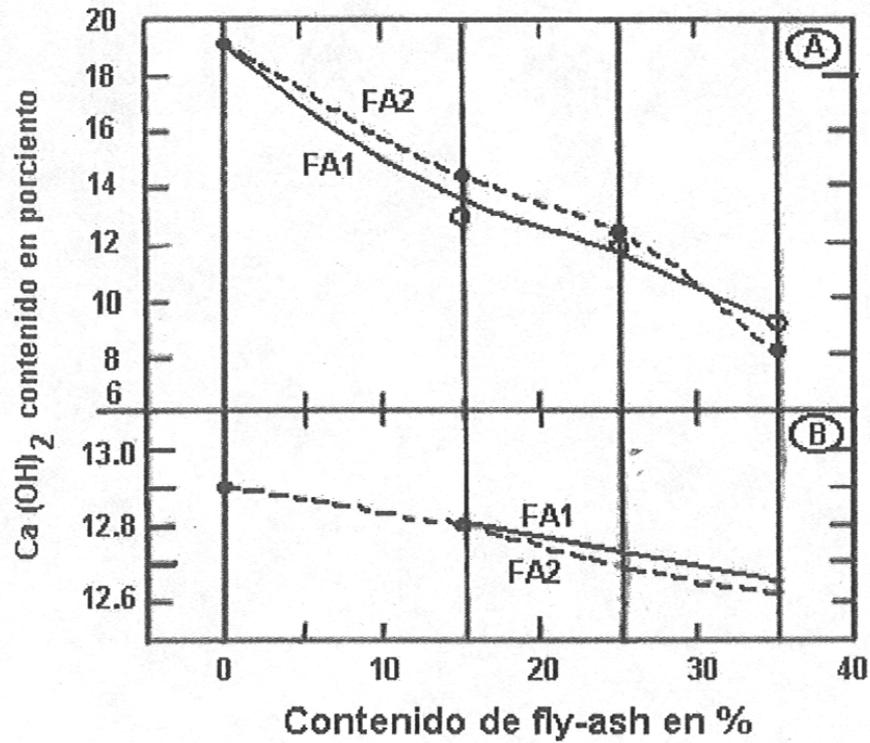


Fig.5.7. Efecto del volumen de fly-ash en (A) $Ca(OH)_2$. (B) El volumen y los pH valoran el agua del poro, en el cemento portland el fly-ash pega a la edad de 150 días.

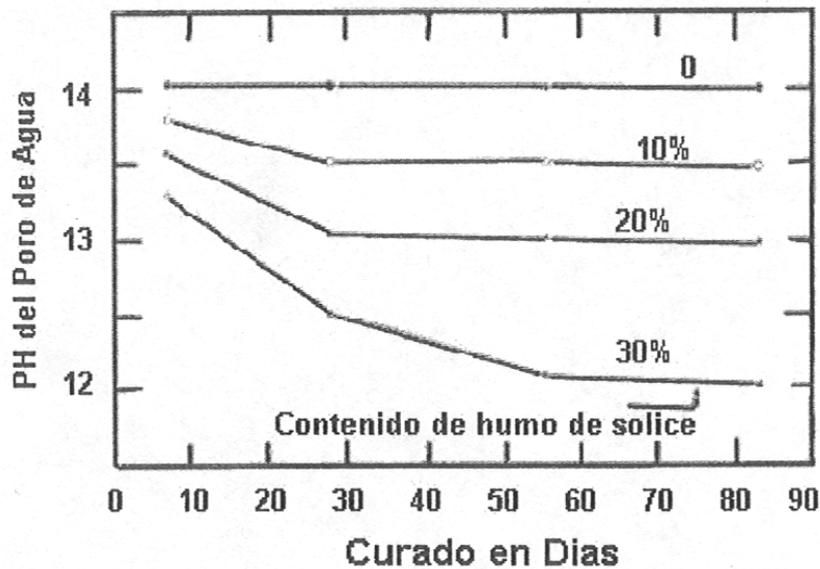


Fig. 5.8. Efecto del volumen de humo de sílice en el valor del pH del agua de poros de pastas de cemento ($W/(C + SF) = 0-50$).

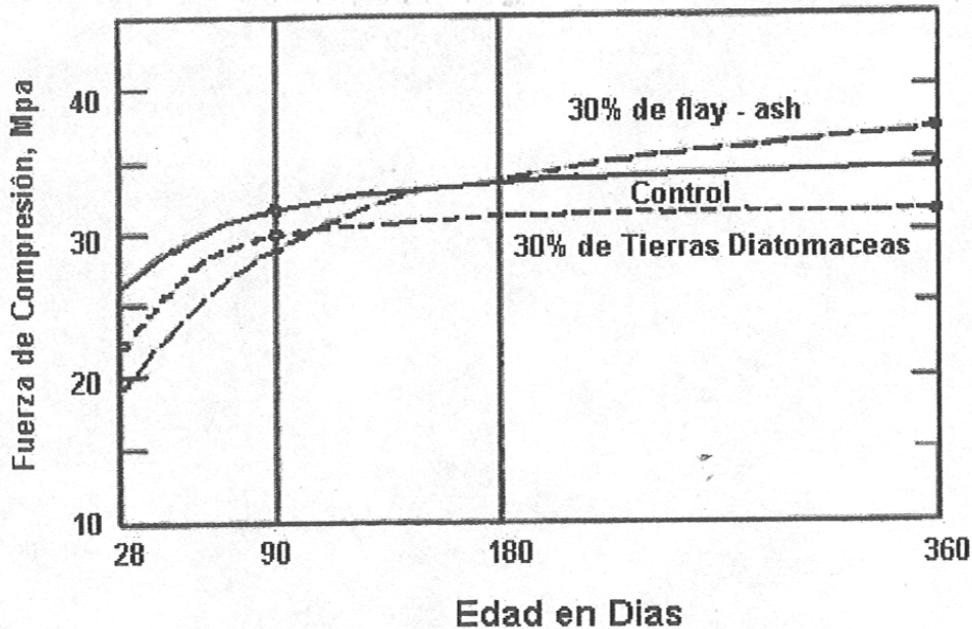


Fig. 5.9. Efecto de reemplazar el 30% de cemento portland por fly-ash, o a través de tierra diatomácea calcinada, en resistencia del concreto.

Aunque los efectos de las puzolanas en la resistencia a temprana edad, han sido ampliamente observados y reconocidos, existen algunos conflictos en la información con respecto a su efecto en la resistencia a tardía edad. Los datos de la Fig. 5.9, por ejemplo, indican que reemplazando el 30% de cemento portland por *fly-ash* produce una resistencia a tardada edad que la producida por el cemento no mezclado, pero no cuando se reemplaza por la misma cantidad de arcilla calcinada diatomácea. Otros datos indican que el uso del *fly-ash* es asociado con la resistencia baja temprana edad (Fig. 5.10). Éstos datos contradictorios pueden ser atribuidos a posibles diferencias en las condiciones del curado y el tipo de *fly-ash* involucrado. En la práctica, sin embargo, a menos que los datos estén disponibles, por el contrario debe asumirse las mezclas puzolana-cemento portland produce menor resistencia que sus equivalentes no mezclados y particularmente cuando el concreto no es curado en un periodo de tiempo amplio.

Cuando se usa humo de sílice para reemplazar cemento portland, debido a su alta reactividad el desarrollo de resistencia del concreto es muy diferente de lo observado cuando se usan otras puzolanas (Fig. 5.11). Es decir, la resistencia a temprana edad es mayor que la del cemento portland no mezclado, y la resistencia a tardada edad no sólo es más alta, pero aumenta con el incremento en el contenido de humo de sílice, también puede notarse que cuando se usan otros agregados puzolanicos, una disminución en la resistencia a tardada edad se observa cuando el contenido de los agregados incrementa.

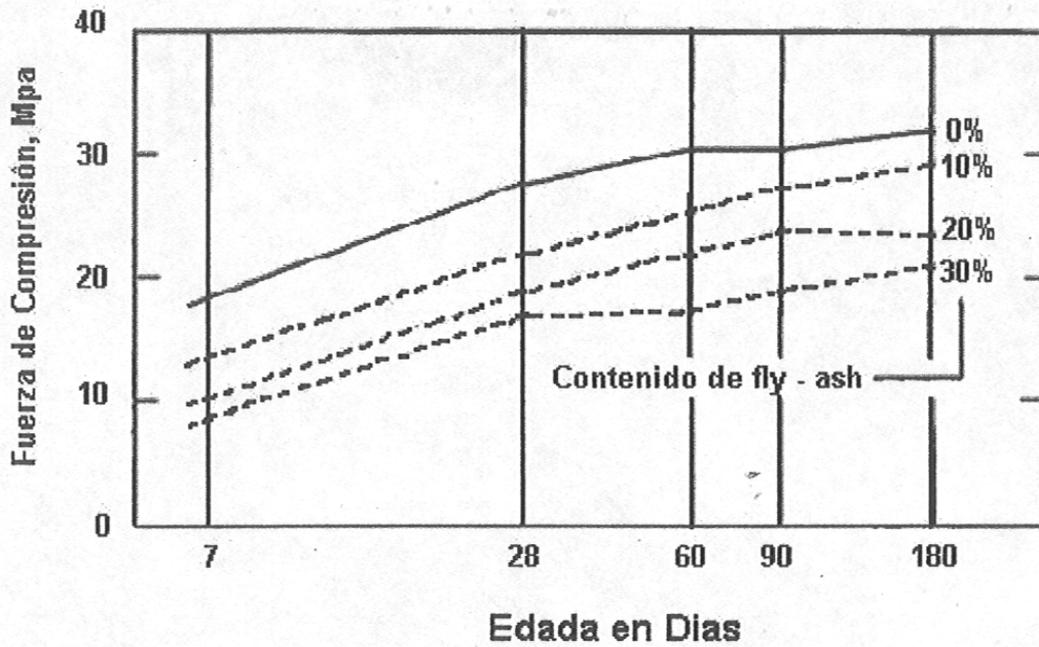


Fig. 5.10. Efecto de reemplazar cemento portland por cantidades diferentes de fly-ash con fuerza de concreto (CPO + el fa = 320kg/rn3, W/(C + el fa) = 0-66, 7 días de curado húmedo).

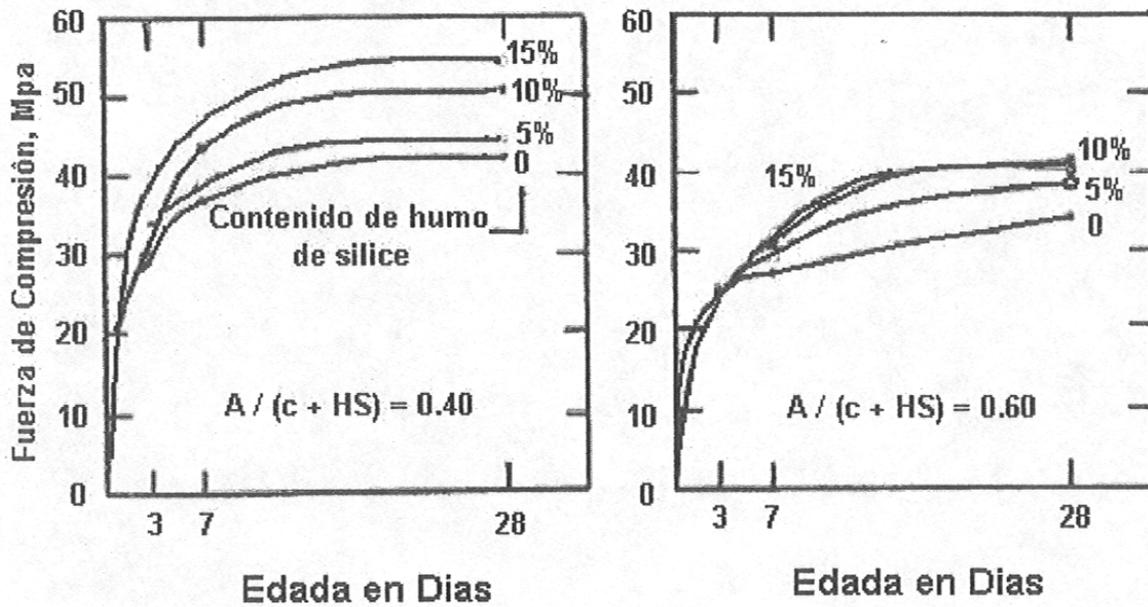


Fig. 5.11. Efecto de reemplazar cemento portland por cantidades diferentes de humo de sílice con la fuerza de compresión del concreto.

Capítulo VI

TRABAJABILIDAD

6.1 Introducción.

La trabajabilidad del concreto, puede definirse como la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad de mezcla de concreto fresco. En esta definición el término significa incluir todos los funcionamientos involucrados para manejabilidad del concreto fresco, llamándolos: transportación, colocación, compactación y también, en algunos casos, terminación. En otras palabras, la trabajabilidad es esa propiedad que hace al concreto fresco fácil de manejar y contraer, sin un riesgo apreciable de segregación.

Puede comprenderse que la trabajabilidad es una propiedad compuesta y como tal, no puede ser determinada cuantitativamente por un solo parámetro. Métodos comunes de prueba (depresión, aparato Vebe) nos determinan la consistencia o la compactabilidad del concreto fresco.

La trabajabilidad es esencialmente determinada por la consistencia y cohesividad del concreto fresco. Para dar al concreto fresco la trabajabilidad deseada, su consistencia y cohesividad debe de ser controlada. La coherencia es lograda por la selección apropiada de las proporciones del mezclado que usan uno de los procedimientos disponibles de diseño de mezclas. En otras palabras, cuando la coherencia se logra, la trabajabilidad se obtiene controlando la consistencia de la mezcla. Se supone que la mezcla endurecida es menos trabajable que una más fluida, y viceversa. Sin embargo, esto no siempre es verdad, porque una mezcla muy húmeda puede exhibir una marcada tendencia a segregar, y como consiguiente, una trabajabilidad pobre.

6.2 Factores que Afectan la Demanda de Agua.

6.2.1 Propiedades de los Agregados.

La consistencia del concreto fresco es controlada por la cantidad de agua que se agrega a la mezcla. La demanda de agua o la cantidad de agua que se requiere para producir una consistencia dada depende de muchos factores, como el tamaño del agregado, su graduación, la textura de su superficie y angulosidad, así como el contenido de cemento y su finura, y en lo posible la presencia de aditivos.

El agua moja la superficie de los sólidos, separa partículas es por eso que actúa como lubricante. A mayor área de la superficie de las partículas, es mayor la cantidad de agua que se requiere para la consistencia deseada, y viceversa. Igualmente, cuando una gran cantidad de agua se usa en el mezclado, la separación entre las partículas sólidas aumenta la fricción es por eso que se reduce, y la mezcla se vuelve más fluida. Lo opuesto ocurre cuando una cantidad más pequeña de agua es usada, la fricción aumenta y la mezcla endurece. Debe comprenderse, que cuantitativamente la relación entre la consistencia y la cantidad de agua en la mezcla no es lineal, sino de una naturaleza exponencial.

Generalmente pueden expresarse matemáticamente por la expresión siguiente:

$$y = CW^n$$

Donde "y" es el valor de consistencia; "W" es el contenido de agua del concreto fresco; C es una constante que depende de la composición de la mezcla, y de un método para determinar la consistencia; "n" es una constante que depende otra vez del método para determinar la consistencia pero no de la composición del concreto. Una representación gráfica de esta ecuación la podemos observar en la Fig. 6.1, donde: $n = 10$. En la Fig. 6.1, el revenimiento de las mezclas húmedas es mas sensible a cambios en la cantidad de agua mezclada que al revenimiento de mezclas endurecidas. En otras palabras, un cambio dado en la cantidad de agua en la mezcla ($\Delta W_1 = \Delta W_2$), causa un cambio mayor en el revenimiento de las mezclas más húmedas que en el revenimiento de las mezclas más duras ($\Delta S_1 > \Delta S_2$).

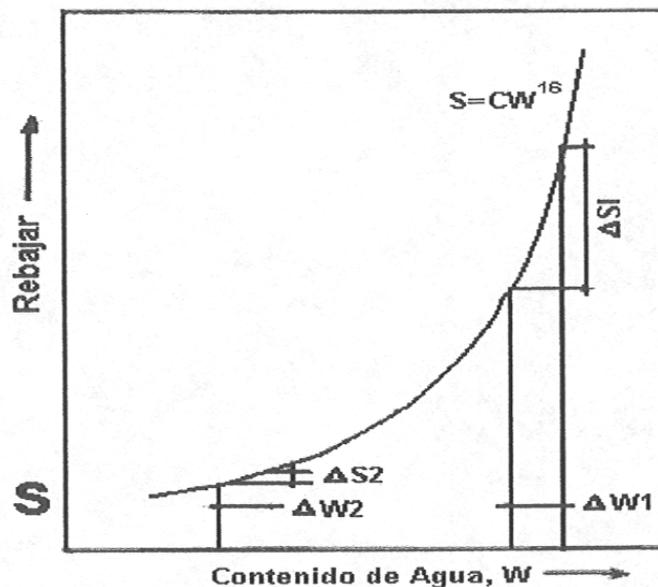


Fig. 6.1. Representación esquemática de la relación entre el revenimiento y la cantidad de agua mezclada.

6.2.2. Temperatura

Se sabe que bajo condiciones de climas calientes se requiere más agua para que una mezcla dada tenga el mismo revenimiento y la misma consistencia. Esto se demuestra, en la Fig. 6.2 y 6.3 y puede verse en la (Fig. 6.2) que bajo condiciones consideradas, una disminución aproximadamente de 25 mm en el revenimiento fue provocada por 10°C de aumento en la temperatura del concreto. Alternativamente, se indica en la Fig. 6.3 que los aumentos en la demanda de agua, de 6-5 kg/m³ para un levantamiento de 10°C en la temperatura del concreto.

El efecto de la temperatura en la demanda de agua viene principalmente de efectos en la proporción de hidratación del cemento, y posiblemente también en la proporción de evaporación del agua.

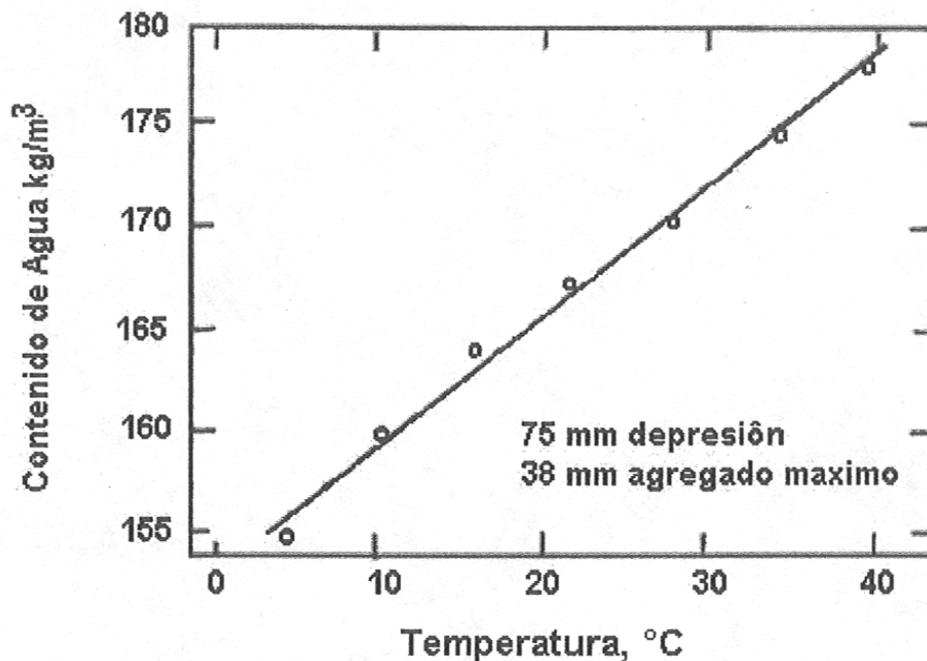


Fig. 6.3. Efecto de la temperatura del concreto en la cantidad de agua requerida para producir 75 mm de revenimiento en un concreto normal.

Los datos del revenimiento de las figuras 6.2 y 6.3 se refieren al revenimiento inicial, el revenimiento es determinado lo más pronto posible después del mezclado. No obstante, pasa el tiempo entre el momento en que el agua se agrega a la mezcla y el momento en el que el revenimiento es determinado.

El cemento se hidrata, y durante este periodo un poco de agua se evapora. Por consiguiente, la mezcla endurece un poco y su revenimiento disminuye. Como los beneficios de hidratación y evaporación incrementan con la temperatura, el endurecimiento asociado se acelera, y la pérdida de revenimiento aumenta. Si se requiere un cierto revenimiento inicial, una mezcla más húmeda debe prepararse para permitir la pérdida de revenimiento mayor que tiene lugar cuando el concreto se prepara bajo temperaturas más altas. Bajo estas condiciones una cantidad mayor de agua es adherida a la mezcla. Este aspecto importante de pérdida del revenimiento se discute después haciendo referencia al papel de la temperatura.

6.3. Factores que Afectan la Perdida del Revenimiento.

6.3.1. Temperatura.

La mezcla de concreto fresco endurece con el tiempo y este endurecimiento se refleja con un revenimiento bajo. A este fenómeno se le llama pérdida del revenimiento. Como ya se mencionó, la reducción en el revenimiento es provocado principalmente por la hidratación del cemento. La evaporación del agua mezclada, y la posible absorción de agua por los agregados, puede constituir una razón adicional que contribuye a la pérdida del revenimiento. La formación de los productos de la hidratación quita un poco de agua libre desde la mezcla fresca, en parte debido a las reacciones de hidratación (el 23% del cemento hidratado por peso), y en parte debido a la absorción física en la superficie de los productos de hidratación resultantes (el 15% del cemento hidratado por peso). De nuevo, más agua puede ser perdida por la evaporación, y la disminución resultante en la cantidad de agua libre reduce su efecto lubricante. La fricción entre el cemento y las partículas de los agregados se aumenta, y la mezcla se vuelve menos fluida, la pérdida del revenimiento tiene lugar.

Una vez que la pérdida del revenimiento se atribuye a la hidratación del cemento y a la evaporación del agua mezclada, se espera que las altas temperaturas del concreto aceleren la proporción en la pérdida del revenimiento. Puede verse en la Fig. 6.4, que la proporción de la pérdida del revenimiento depende de la temperatura, solamente en las mezclas más húmedas (revenimiento inicial 180-190 mm) considerando que en las mezclas más duras el (revenimiento inicial es de 90 mm) la proporción permanecerá igual e independiente a la temperatura. Esencialmente la misma conducta es indicada por los datos de la Fig. 6.5, la proporción de la pérdida del revenimiento en las mezclas más húmedas (revenimiento inicial 205 mm) era mayor a los 32°C que a los 22°C, considerando que la proporción en las mezclas más duras (revenimiento inicial 115-140 mm) permanece virtualmente el mismo, las curvas de pérdida del revenimiento permanecen más paralelas.

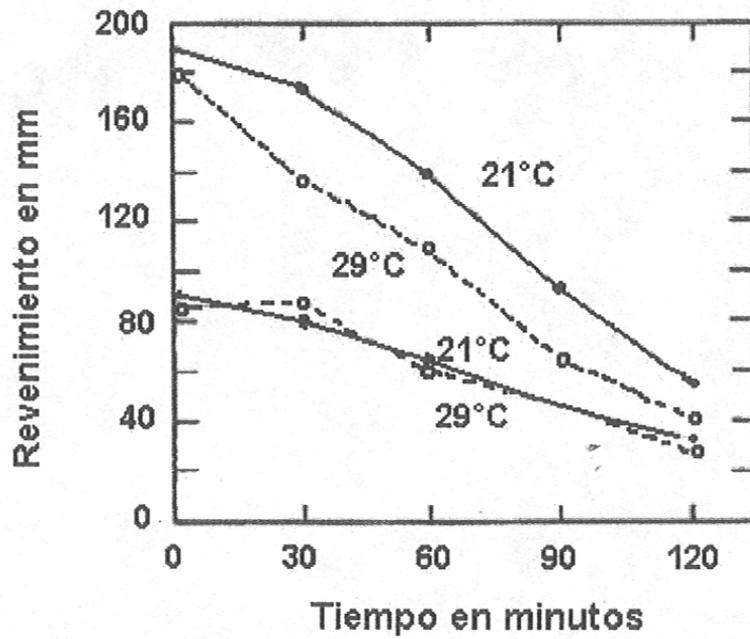


Fig.6.4. Efecto de la temperatura y del revenimiento inicial en la perdida del revenimiento del concreto.

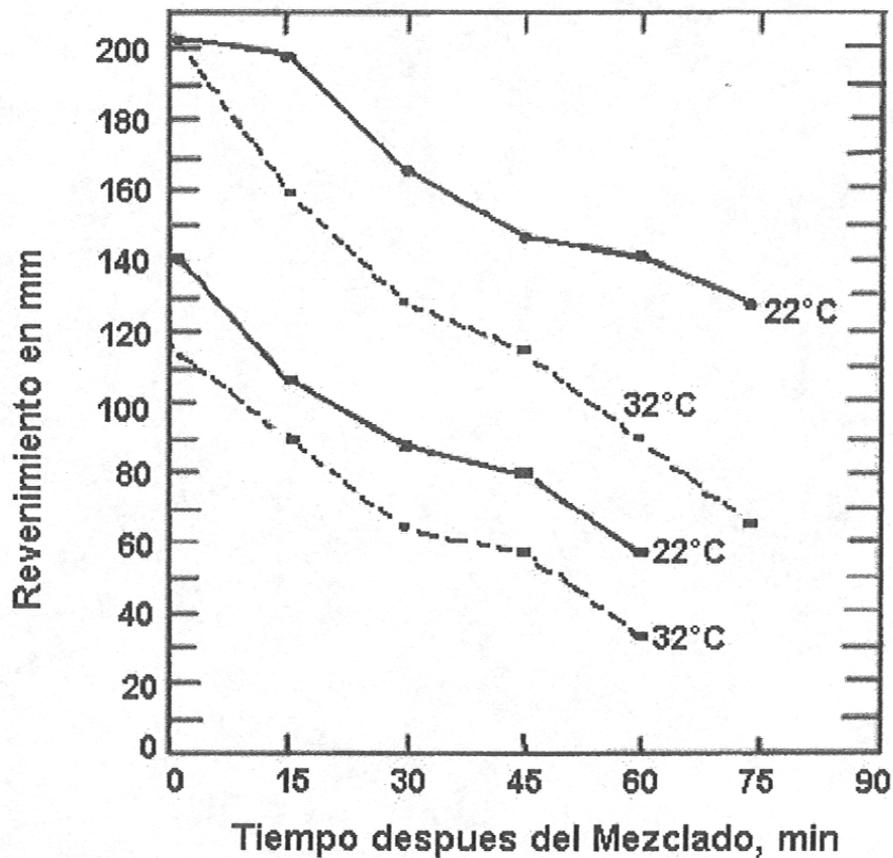


Fig. 6.5. Efecto de la temperatura en la pérdida del revenimiento.



La diferencia en la pérdida del revenimiento de mezclas húmedas y endurecidas es atribuible en parte al hecho de la consistencia de mezclas más duras que son menos sensibles a los cambios en la cantidad de agua mezclada, que al de las mezclas más húmedas (Fig. 6.1). Puede concluirse, que el posible efecto adverso de las altas temperaturas puede evitarse en su consistencia, o por lo menos reducirse, por el uso de mezclas caracterizadas por un revenimiento moderado, o por un revenimiento alrededor de 100mm, sin embargo, la pérdida del revenimiento de las mezclas húmedas y secas deben de depender de la temperatura, porque esta perdida es provocada por la hidratación del cemento y la evaporación del agua mezclada que, a su vez, esta a cargo de la temperatura. La pérdida del revenimiento del concreto se acelera con la temperatura, y este efecto toma lugar necesariamente en las mezclas más húmedas. De hecho la aceleración, efecto de la temperatura en la proporción de la pérdida del revenimiento constituye uno de los principales problemas del concreto bajo condiciones de climas calientes.

6.3.2 Aditivos Químicos.

6.3.2.1 Clasificación.

Hay diferentes tipos de aditivos químicos. La ASTM C-494 por ejemplo, reconoce cinco tipos: aditivos reductores de agua (tipo A), aditivos retardantes (tipo B), aditivos aceleradores (tipo C), aditivos reductores de agua y retardantes (tipo D), aditivos reductores de agua y acelerantes (tipo E). Estos tipos de aditivos a veces son colectivamente llamados Aditivos convencionales. Otros tipos incluyen los aditivos inclusores de aire (ASTM C 260) y aditivos reductores de agua de alto rango (ASTM C 1017), normalmente conocidos como superplastificantes. La ASTM C 1017 cubre dos tipos de superplastificantes que son llamados plastificantes (tipo I), y plastificantes y aditivos retardantes (tipo II). Los aditivos químicos son producidos comercialmente y, aunque obedecen las mismas normas pertinentes, pueden diferir considerablemente en su composición y los efectos específicos de las propiedades del concreto.

6.3.2.2 Aditivos Reductores de Agua.

Los aditivos reductores de agua son, por definición aditivos que reducen la cantidad de agua en la mezcla requerida para producir concreto de una consistencia dada, (ASTM C 494). Generalmente dependiendo del volumen de cemento, tipo de agregado, etc., y, por supuesto, el aditivo específico involucrado, el reductor de agua real varía entre el 5 y el 15%.

Una reducción mayor en el contenido de agua no puede lograrse dosificando dos o tres veces, porque dicha dosificación puede producir una excesiva inducción de aire y una tendencia mayor a la segregación y a veces también al fraguado. Los aditivos reductores de agua de alto rango (superplastificantes) son comparativamente una nueva forma de aditivos reductores de agua, que pueden reducir hasta un 25% el agua de mezclado, sin afectar las propiedades adversamente del concreto fresco y endurecido. El efecto acelerado de la temperatura en la pérdida del revenimiento puede ser superado usando bajo condiciones de climas calientes, una mezcla más húmeda que normalmente requiere bajas temperaturas moderadoras que aumenta la cantidad de agua en la mezcla es la manera más obvia de conseguir semejante mezcla.

Sin embargo, semejante aumento de agua en la mezcla no es deseable y, en todo caso, sólo depende de una cierta cantidad que exceda resultados en una mezcla con una tendencia alta a la segregación. Por consiguiente, aumentando la cantidad de agua en la mezcla sólo pueden ser soluciones prácticas bajo las condiciones moderadas mientras que bajo condiciones más severas otros medios deben ser considerados, como el uso de aditivos reductores de agua. Debe comprenderse, que el uso de aditivos a veces aumenta una proporción de la pérdida del revenimiento.

6.3.2.3 Aditivos Retardantes.

Un Aditivo retardante, es un aditivo que retarda el fraguado del concreto (ASTM C 494). De acuerdo con la reducción del agua y retardo de la mezcla, se combinan los efectos de reducir agua y retardar a ésta y como el fraguado se retrasa permite una reducción en la cantidad de agua en la mezcla. Como ya se ha mencionado, los aditivos tipo D y 2, de acuerdo con la ASTM C 494 y C 1017 respectivamente, son preferibles para concretos en climas calurosos. Un aditivo retardante reduce la velocidad de hidratación del cemento y por consiguiente el retraso en el fraguado. Debido a la proporción lenta de hidratación, una cantidad menor de agua, es combinada con el cemento en un momento dado. Por consiguiente, la pérdida del revenimiento correspondiente. En otras palabras, el uso de aditivos retardantes reduciría la proporción de pérdida del revenimiento, y por consiguiente puede ser útil en el efecto de aceleración de la temperatura que se pueda presentar. Este efecto no ha sido confirmado con pruebas de laboratorio para condiciones de transporte del concreto (concreto premezclado), fue considerado cuando el concreto ha sido agitado desde el momento de mezclado hasta el momento de entrega.

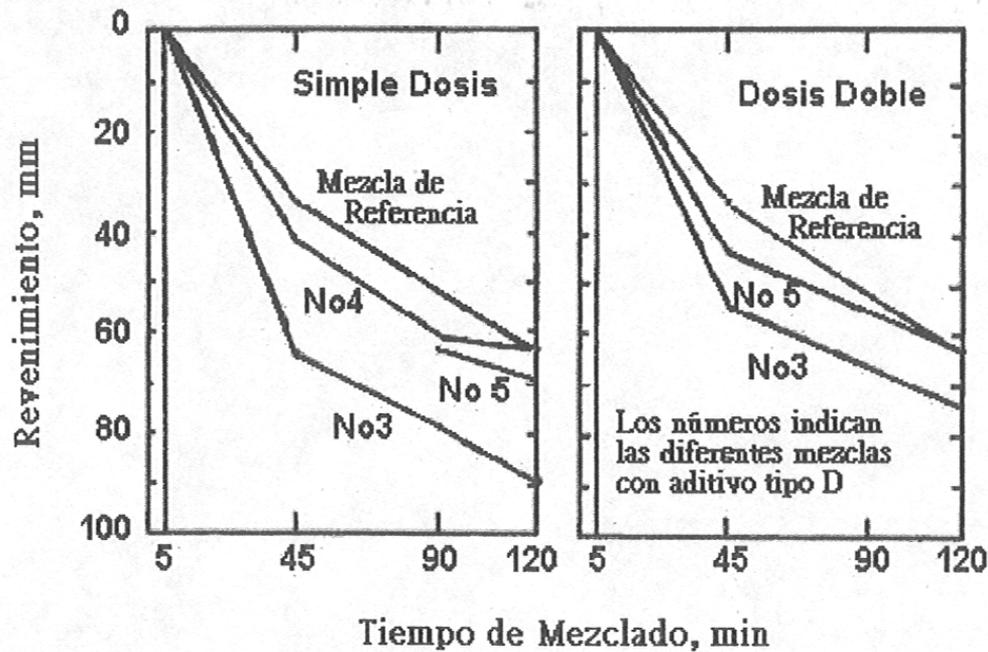


Fig. 6.6. Efecto de reducción de agua y aditivos retardantes en la pérdida del revenimiento. Aditivos tipo D, revenimiento inicial es de 95 a 115mm, temperatura 30°C.

El efecto de un aditivo tipo D en la pérdida del revenimiento en el concreto sujeto a 30°C se muestra en la Fig. 6.6. Es evidente que la presencia de los aditivos, dependiendo de su tipo específico y dosificación; La pérdida del revenimiento aumenta en lugar de disminuir. Esta observación ha sido confirmada por muchos otros dando lugar a la pregunta, puede o no este tipo de aditivo recomendarse para el uso en condiciones de climas calientes.

El incremento en la pérdida del revenimiento se observó cuando se usaron aditivos con menos agua, esto implica que los aditivos en cuestión realmente aceleraron el ritmo de hidratación. Puede ser el caso al utilizar aditivos tipo A, ASTM C 494 permite que el tiempo de fraguado del concreto que contiene este tipo de aditivo este 1 hora antes que el tiempo de fraguado de la mezcla de control. Es decir, en este caso el aditivo actúa como un acelerador, es por eso que causa un endurecimiento más rápido y una proporción más alta en la pérdida del revenimiento. Sin embargo, el aumento en la pérdida del revenimiento observado cuando se uso un aditivo tipo D, garantiza la explicación de porque estos tipos de aditivos retardan el fraguado cuando son examinados de acuerdo con la ASTM C 494. Los comportamientos aparentemente contradictorios pueden atribuirse a la diferencia en las condiciones de la prueba involucrada, es decir, se observo el incremento en la pérdida del revenimiento durante la colocación de un concreto, que de una manera o de otra, agitado continuamente o ya sea periódicamente, el tiempo de fraguado es determinado en un concreto que permanece tranquilo (ASTM C 403).

Se han adelantado varias teorías para explicar el mecanismo de retraso. La teoría de absorción sugiere que la mezcla absorbe en las superficies de los granos de cemento deshidratados, y por eso se impide al agua reaccionar con el cemento. Otra teoría, la teoría de precipitación, sugiere que el retraso es causado por la formación de una capa insoluble de sales de calcio que retardan los productos de hidratación. Cuando un concreto está agitado, y particularmente si la agitación toma lugar continuamente y por largos periodos, el mecanismo retardador no opera y se espera que bajo estas condiciones un aditivo tipo D procederá a ser semejantemente al tipo A..

En la práctica, cuando un largo periodo está envuelto, no hay una gran ventaja al usar un aditivo tipo D, y con este fin se usa el tipo A producto de pruebas esencialmente de efectos iguales. Éste no puede ser el caso en un concreto no vibrado donde el efecto retardante del aditivo tipo D es deseable porque el fraguado se retarda y ayuda a prevenir las juntas frías, etc. Se verá después que aunque el uso de reductores de agua (tipo A) o reductores de agua y retardantes (tipo D) en muchos casos se asocian con una proporción más alta en la pérdida del revenimiento, el uso de tales aditivos es beneficioso si se utilizan para aumentar el revenimiento inicial de la mezcla, y no necesariamente para reducir la cantidad de agua en la mezcla. Cuando los periodos de retardo son cortos, aumenta el revenimiento inicial del concreto y puede proporcionar la respuesta a la pérdida del revenimiento aumentado debido a la temperatura.

6.3.2.4 Superplastificantes.

Se menciono antes que el uso de superplastificantes afecta la consistencia de la mezcla de concreto a una magnitud mucho mayor que el uso de reductores de agua de uso convencional, facilitando una reducción del 25% en la cantidad de agua de mezcla sin adversamente afectar las propiedades del concreto. Por consiguiente, cuando aumenta la fluidez de la mezcla, los superplastificantes pueden aumentar el revenimiento de 50-70 mm o a 200 mm o más, con la mezcla resultante permanece cohesivo y no exhibe sangrando excesivo o segregación. Es más, en la relación agua cemento (A/C) la proporción no cambia, y la fuerza de los restos del concreto virtualmente son los mismos. De hecho, de semejante manera se usa para producir un concreto fluido que puede permanecer con una poca o con ninguna compactación, y es útil, por ejemplo, al poner concreto en secciones delgadas y pesadamente reforzadas. El concreto fluido también puede ser útil en condiciones de climas calientes para superar el efecto adverso de las temperaturas altas en la pérdida del revenimiento. Sin embargo, el efecto de los superplastificantes en cuanto a consistencia del concreto es comparativamente de corta vida y, generalmente dura de 30-60 min. en adherirse a la mezcla, incluso bajo temperaturas moderadas.

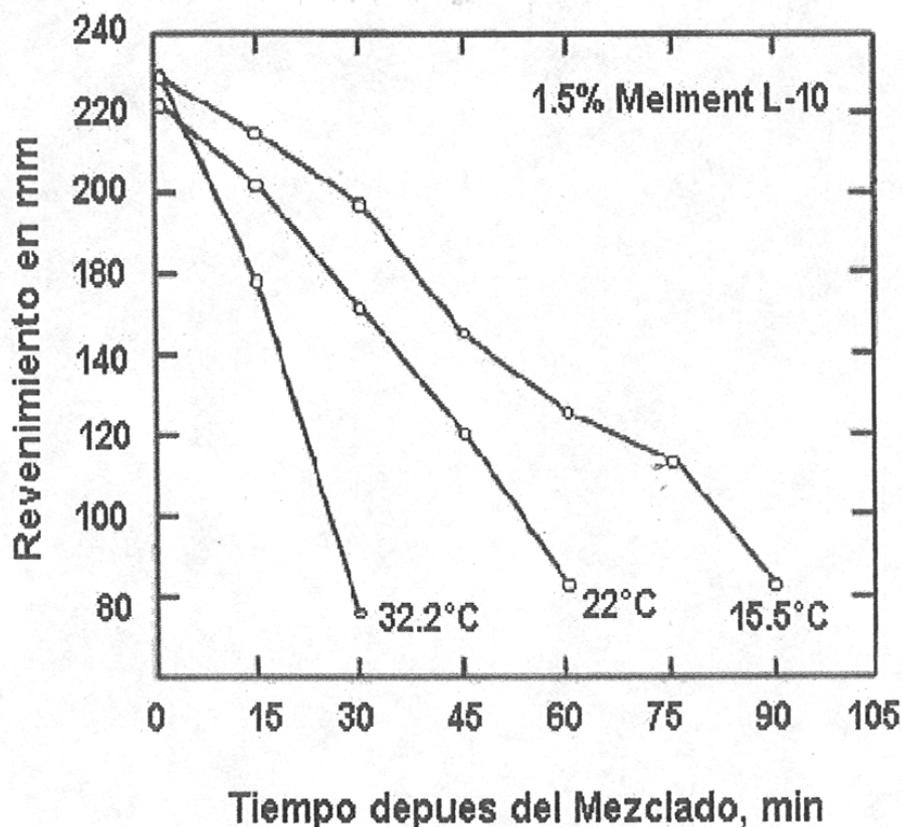


Fig. 6.7. Efecto de la temperatura en la pérdida del revenimiento del concreto hecha con un superplastificante (1.5% Melment L-10).

Este periodo de tiempo (30- 60 min.) es mucho más corto bajo temperaturas más altas porque la proporción de la pérdida del revenimiento aumenta en mezclas con plastificantes con temperaturas a una magnitud apreciable (Fig. 6.7). Es más, semejante concreto contiene reductores de agua convencionales (Fig. 6.6), la proporción de la pérdida del revenimiento en el concreto con superplastificantes no siempre es mayor que la proporción de la pérdida del revenimiento en concretos que no tienen superplastificantes, (Fig. 6.8). Al parecer, nuevos tipos de superplastificantes están ahora disponibles para incrementar la consistencia del concreto por periodos más largos, y por eso son más eficaces bajo las condiciones de climas calientes. Puede verse que el uso del último plastificante (Fig. 6.8 mezcla con superplastificante "C") reduce considerablemente la proporción de la pérdida del revenimiento, y por consiguiente, el revenimiento de la mezcla después de 3 horas permanece comparativamente alto y es más adecuado para la mayoría de los propósitos del concreto.

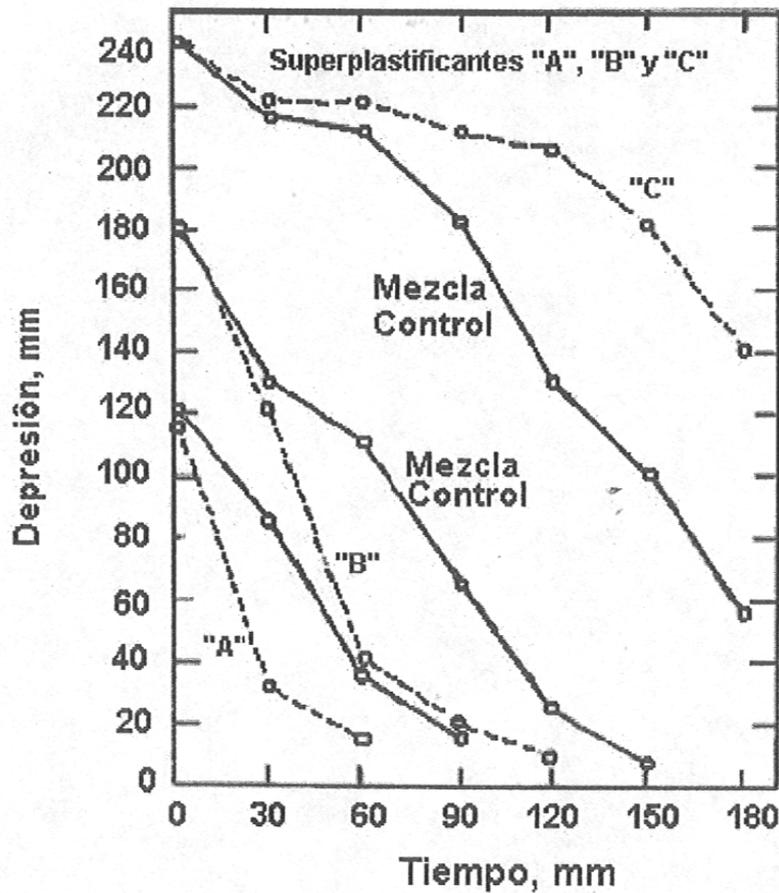


Fig. 6.8. Efecto de superplastificantes en la pérdida del revenimiento en concretos con diferentes revenimientos iniciales.

Sin embargo, los superplastificantes, pueden ser usados con éxito en condiciones de climas calientes porque ellos facilitan un aumento considerable en el revenimiento inicial, y por eso superan la pérdida del revenimiento subsecuente. En este aspecto puede notarse que a veces se usan superplastificantes, no sólo para aumentar el revenimiento al nivel deseado, pero si para reducir la cantidad de agua en la mezcla. A su vez, esta reducción puede utilizarse para reducir el volumen de cemento o, alternativamente, impartir al concreto mejores propiedades debido a la más baja relación A/C. Además, bajo las condiciones más severas, donde semejante aumento en el revenimiento inicial no es suficiente, pueden usarse superplastificantes con éxito para reemplazar.

6.3.3. El fly-ash.

A veces se usa *fly-ash*, escoria de alto horno y puzolanas como un reemplazo parcial del cemento portland. En condiciones de climas calientes, este reemplazo puede juzgarse deseable porque reduce la proporción de evolución de calor, y por eso puede reducir la variación en la temperatura del concreto y a su vez es asociada a efectos adversos en las propiedades del concreto, incluso la proporción de la pérdida del revenimiento.

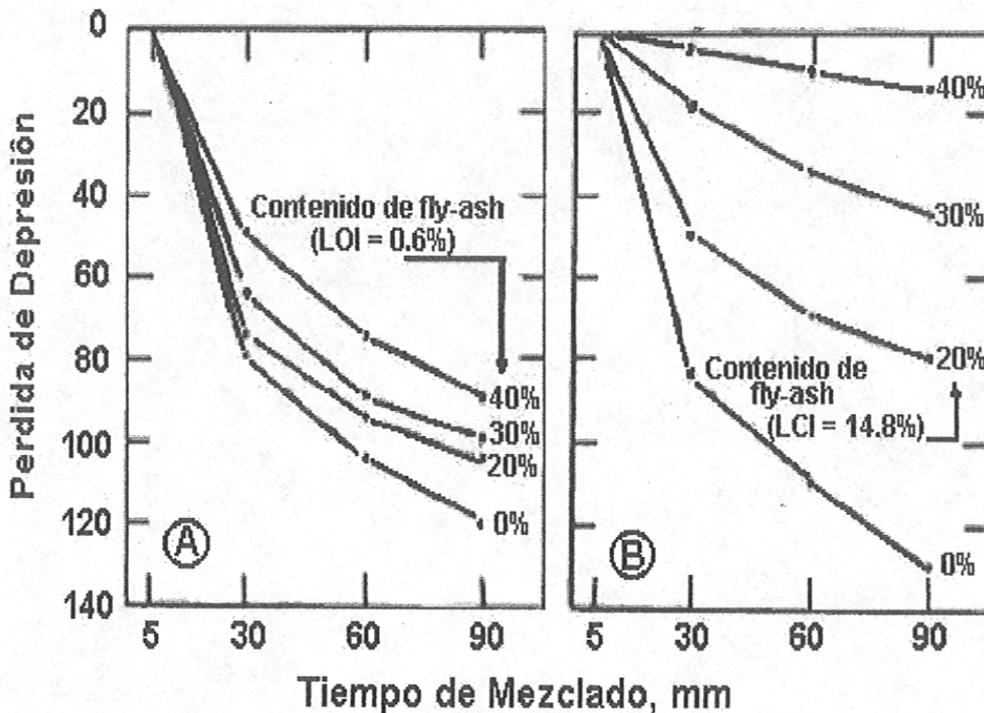


Fig. 6.9. Efecto de reemplazar el cemento con *fly-ash* tipo F (ASTM 618) en la proporción de la pérdida del revenimiento de 30°C. Pérdida de ignición de (A) *fly-ash* 0-6%, y de (B) *fly-ash* 14-8%.

De hecho, el reemplazo de cemento portland por *fly-ash* tipo F (*fly-ash* que se origina de carbón bituminoso) se encontró que reduce la proporción de la pérdida del revenimiento en un concreto mixto prolongado, y esta reducción aumenta con un incremento en el porcentaje del cemento reemplazado (Fig. 6.9). Este efecto no puede atribuirse al volumen resultante más bajo de cemento, y al calor más bajo asociado con la hidratación, porque se reemplazo el cemento por cantidades idénticas de arena fina afectando la pérdida del revenimiento. Es decir, el uso del *fly-ash*, por razones que no están todavía claras, provoca la reducción en la proporción de la pérdida del revenimiento.

Se encontró el efecto beneficioso del *fly-ash* en la proporción de la pérdida del revenimiento para ser relacionado a su pérdida de ignición (LOI), un LOI más alto provocó una reducción mayor en la proporción de la pérdida del revenimiento (Fig. 6.9). Es bastante difícil de explicar esta observación, y de ninguna manera se considera como una recomendación para usar *fly-ash* de alta ignición (LOI) en el concreto. Esto último puede ser deseable con respecto a la pérdida del revenimiento, pero debe recordarse que un alto LOI (alta pérdida de ignición) indica que el volumen del carbón hecho ceniza, puede ser perjudicial a las propiedades restantes del *fly-ash* en el concreto. Sin tener en cuenta el hallazgo anterior, el uso del *fly-ash* con un alto LOI debe ser evitado.

6.3.4. Mucho tiempo de Mezclado y la Entrega a Tiempo

La agitación del concreto, mientras que es transportado por un camión, se emplea en el orden para determinar el fraguado y facilitar el periodo de acarreo con algo de tiempo. La agitación continua produce un efecto de molienda que retrasa el fraguado separándose la estructura y formando por otra parte los productos de hidratación. Este efecto también es conocido como levantamiento de algunos productos de hidratación en la superficie de los granos de cemento hidratados, y por eso la exposición de nuevas superficies por hidratar.

En otras palabras, el fraguado se retrasa por agrietarse la estructura, la hidratación se acelera dada a la mejor exposición del agua en el grano de cemento. Una proporción mayor de hidratación implica una proporción mayor en el consumo de agua, y por eso una proporción mayor de la pérdida del revenimiento. Es más, el efecto de molienda produce un material fino que aumenta el área de la superficie específica de los sólidos en la mezcla.

Consecuentemente más agua se absorbe y se mantiene en la superficie de los sólidos, la cantidad de agua libre en la mezcla reduce la proporción de la pérdida del revenimiento que después se incrementa. En otras palabras, se espera que la proporción de la pérdida del revenimiento en el concreto, continúe agitándose más que la proporción correspondiente no agitada en el concreto. Esta implicación se refleja en las recomendaciones del comité de la ACI 305, la cual estando la cantidad mezclada y agitada debe sostenerse al mínimo práctico, y debe darse la condición de acarreo del concreto en la olla agitándose hacia el lugar de la obra. Este efecto de agitación en la pérdida del revenimiento es confirmado por los datos presentados en la Fig. 6.10 pero no por los datos presentados en la Fig. 6.11. de hecho, la Fig. 6.11, indica que la agitación del concreto retarda en lugar de acelerar la proporción de la pérdida del revenimiento. Sin embargo, en un concreto en reposo, la pérdida del revenimiento es aparentemente independiente de si o no el concreto está agitado. También pueden notarse en la Fig. 6.11 que el uso de retardantes aumenta la pérdida del revenimiento en un concreto agitado o no agitado.

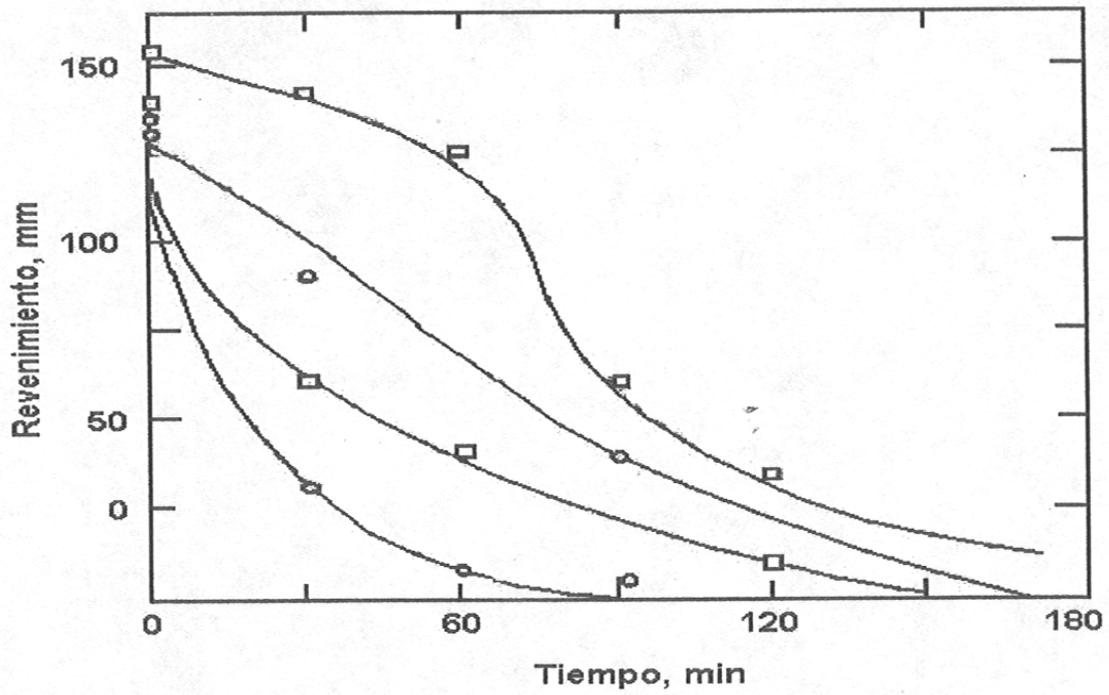


Fig. 6.10. Efecto de agitación continua en la pérdida del revenimiento del concreto.

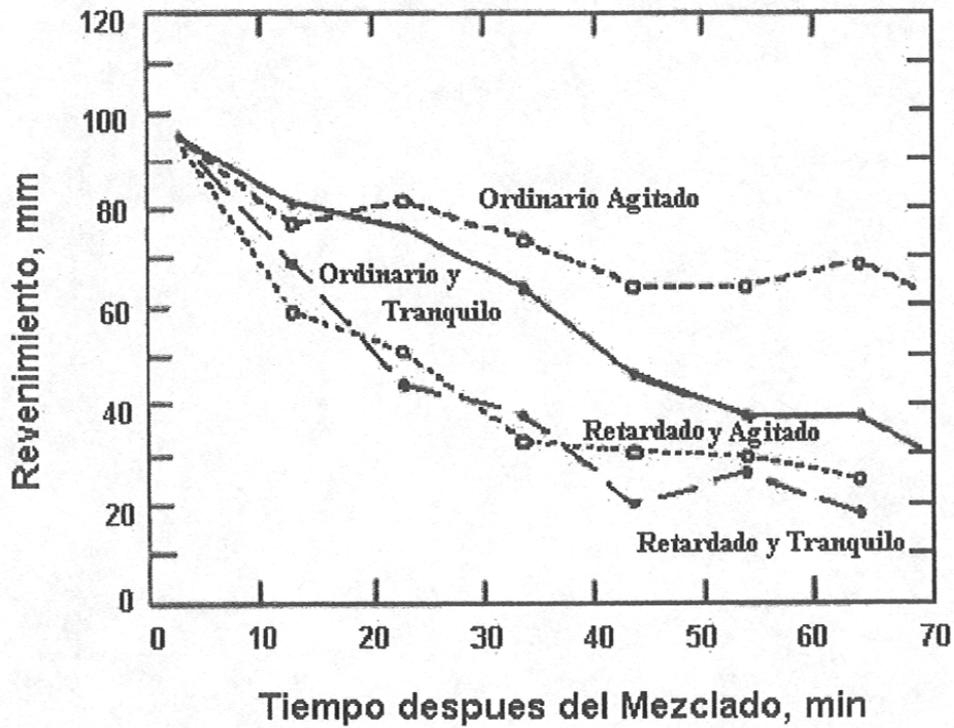


Fig. 6.11. Efecto de agitación continua en la pérdida del revenimiento del concreto de los 21-24°C.

Considerando los datos de la sección 6.3.2.3, donde el uso de aditivos retardantes en un concreto agitado puede cuestionarse o quizás, incluso puede evitarse totalmente. Se espera que el periodo de entrega más largo, será asociado con una pérdida de revenimiento mayor debido al periodo de hidratación que es más largo e involucra el tiempo de la exposición más larga del concreto con el efecto de molienda. Es más un incremento en la pérdida del revenimiento será esperado con las altas temperaturas.

Estos efectos esperados son confirmados por los datos presentados en la Fig. 6.12, aquí la cantidad de agua mezclada requirió producir un revenimiento de 10 cm, el tiempo de descarga, se traza contra el tiempo de la entrega correspondiente. En esta figura al requerir más agua implica una pérdida mayor en el revenimiento en el momento de la descarga. Puede verse que, la pérdida del revenimiento incrementa con la temperatura y el tiempo de la entrega. También puede notarse en la Fig. 6.12 que se usó una mezcla con un reductor de agua o *fly-ash* (tipo F) y era beneficioso porque redujo la cantidad de agua en la mezcla, que requirió el control del revenimiento en el momento de la descarga. Parece que el *fly-ash* es preferible porque su efecto es menos sensible a la hora de la entrega.

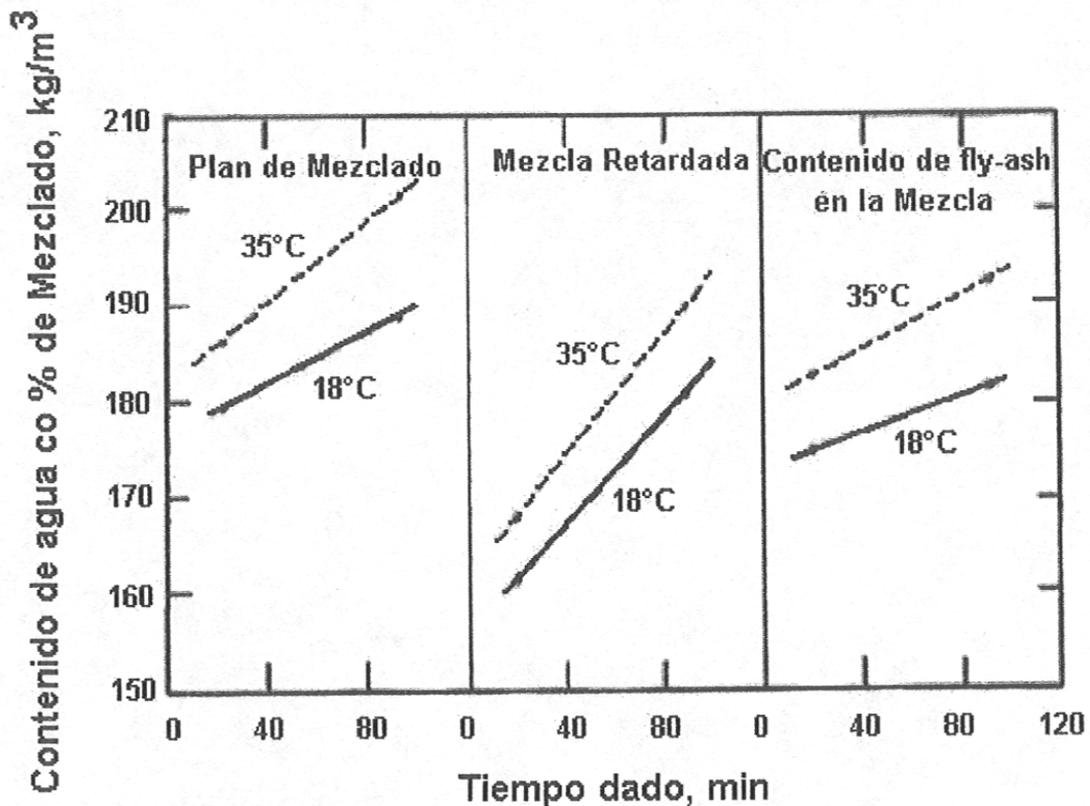


Fig. 6.12. Efecto en el tiempo de entrega y temperatura en la cantidad de mezclado de agua requerida al producir 10 cm de revenimiento en el momento de la descarga.

Capítulo VII

CONTROL DE LA TRABAJABILIDAD

7.1 Aumento del Revenimiento.

La consistencia de una mezcla de concreto, en el momento de entrega debe ser adecuada para facilitar su manejabilidad sin ningún riesgo apreciable a la segregación, es muy importante impartir al concreto fresco la consistencia requerida y en lo que a esto se refiere el efecto de elevadas temperaturas en la pérdida del revenimiento debe ser considerado. El revenimiento requerido depende de muchos factores, como las dimensiones mínimas de los elementos de concreto, el espacio entre las varillas por ejemplo, etc. Un revenimiento mínimo de 5 cm es algunas veces el límite, también cuando se utiliza un camión mezclador al descargar. Este valor parece ser bastante bajo para aplicaciones normales, y un valor más alto de 7.5-10 cm puede ser considerado por lo menos en un diseño de mezclas. El tiempo después del mezclado, cuando se requiere un revenimiento, puede variar considerablemente. Puede ser de 30 min o menos cuando el concreto es producido en el sitio, y de 2-3 horas o más, cuando la distancia de acarreo es larga. A grandes tiempos de acarreo y altas temperaturas del ambiente, es más difícil superar la pérdida del revenimiento y dar la consistencia deseada al concreto en el momento de la descarga.

El efecto acelerado de las altas temperaturas en la pérdida del revenimiento puede ser superado usando uno o algunos de los métodos siguientes que son descritos esquemáticamente en la Fig. 7.1.

- (1) Usando una mezcla húmeda; que es una mezcla con un revenimiento inicial más alto. La proporción de la pérdida del revenimiento, en mezclas donde se conoce un alto revenimiento es conocido por ser más alto que en las mezclas de bajo revenimiento. El revenimiento más alto puede ser producido usando una cantidad de agua en la mezcla mas alta o usando un aditivo reductor de agua.
- (2) Reduciendo la temperatura inicial del concreto manteniéndolo lo más posible a la temperatura ambiente, o bajando la temperatura usando agua fría o hielo.
- (3) Retemplado de la mezcla, restaurando el revenimiento inicial del concreto fresco remezclando con un poco de agua adicional o un plastificante conveniente.

La curva-A en la Fig. 7.1, representa la pérdida del revenimiento contra el tiempo, en una mezcla de concreto sujeta a moderadas temperaturas. Teniendo el revenimiento inicial, S_0 , alcanza el mínimo absoluto, S_{\min} en el tiempo t_0 después del mezclado, cuando en este contexto el mínimo absoluto es el revenimiento más bajo que permite manejar al concreto propiamente. Cuando la misma mezcla se sujeta a temperaturas más altas, la proporción de la pérdida del revenimiento aumenta y el mínimo absoluto es alcanzado después de un corto tiempo t_1 , que no puede ser mucho el tiempo bajo condiciones consideradas (curva B). Para extender el tiempo trabajable de la mezcla, el revenimiento inicial puede aumentar a S_1 . La proporción de la pérdida del revenimiento de esta mezcla de alto revenimiento (curva C) es mayor que la mezcla que tiene un revenimiento inicial, S_0 , pero no obstante, la mezcla permanece trabajable durante el tiempo más largo, t_2 . Si el tiempo t_2 no es bastante, el tiempo trabajable de la mezcla puede ser extendido a t_3 retemplando la mezcla (curva D). Finalmente, bajando la temperatura del concreto, la proporción de la pérdida del revenimiento se reduce, y puede ser representada por una curva A en lugar de una curva B.

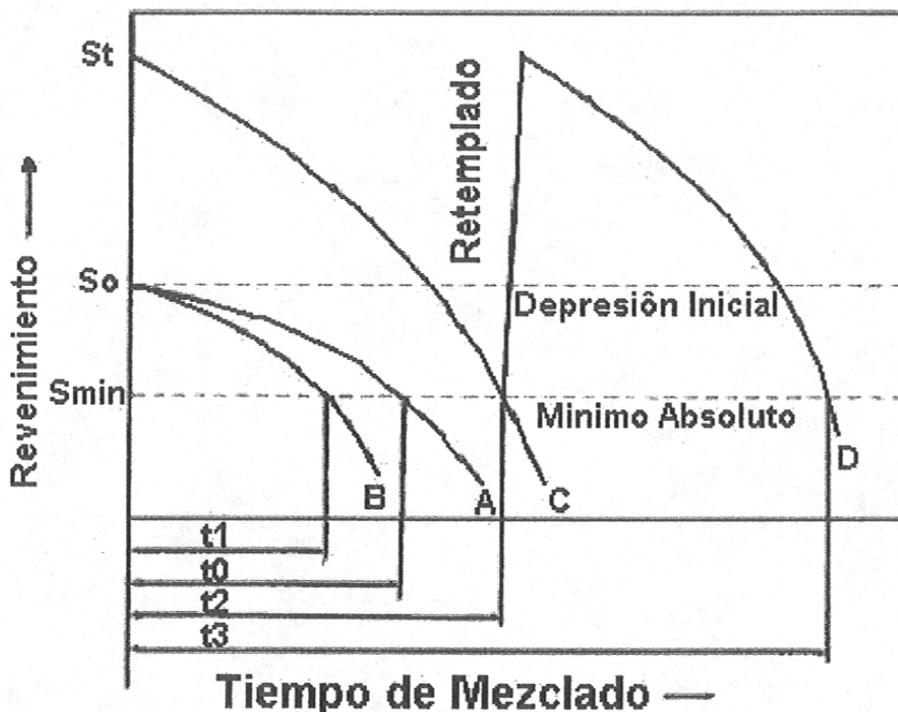


Fig. 7.1. Representación esquemática de métodos posibles para superar el efecto de temperaturas altas en pérdidas de revenimiento.

La eficacia de los métodos anteriores se refleja en la representación esquemática de la Fig. 7.1, pueden notarse que la temperatura del concreto baja y puede constituir una solución cuando se requiere de un tiempo relativamente corto. Para trabajar usando una mezcla húmeda puede resultar con tiempos mas cortos y retemplando con tiempos mucho mas largos.

7.2 *Aumentando el Revenimiento Inicial*

La manera más obvia y conveniente de aumentar el revenimiento inicial es aumentando la cantidad de agua en la mezcla. En la práctica, puede usarse agua para producir revenimientos no más altos de 15-18 cm, porque las mezclas húmedas normalmente exhiben una tendencia excesiva a segregar. Una limitación extensa en el aumento de la cantidad de agua, involucra su efecto en la relación A/C, y de ahí en las propiedades del concreto. Este efecto puede ser evitado por un aumento correspondiente en el contenido de cemento permitido por un incremento en la relación A/C. Un incremento en el contenido de cemento no es necesariamente conveniente, porque da al concreto una alta contracción por secado y por lo tanto más susceptible a agrietarse.

Es preferible entonces usar una mezcla con un aditivo reductor de agua convencional o de alto rango (superplastificante), en lugar de agua para aumentar el revenimiento inicial de la mezcla. Es decir en esta aplicación, el aditivo no es usado para reducir la cantidad de agua en la mezcla sino para aumentar la fluidez de la mezcla. Esto puede ser diferente cuando se usan superplastificantes. Por último siendo los reductores de agua mucho más eficaces, a veces pueden permitir la reducción en la cantidad de agua en la mezcla y el incremento en el revenimiento.

7.3 *Bajando la Temperatura del Concreto.*

En esta sección la disminución de la temperatura del concreto es discutida principalmente por la acelerada pérdida del revenimiento, el cual es provocado por las altas temperaturas del ambiente. Esto es un aspecto muy importante, y se garantiza por si mismo una solución adecuada y satisfactoria. Es conveniente mantener la temperatura del concreto tan baja como sea posible para reducir los efectos adversos en la resistencia del concreto a altas temperaturas y su vulnerabilidad a la desintegración térmica, etc. Se puede argumentar que es preferible un concreto con temperatura baja, para incrementar su revenimiento inicial con el fin de contrarrestar la pérdida de revenimiento acelerada. Para este caso se puede usar una operación de enfriado de concreto pero es costosa y sólo es económicamente factible en proyectos grandes donde se producen y se colocan cantidades grandes de concreto. Se dispone de algunos medios para mantener la temperatura del concreto tan baja como sea posible. Las líneas aislantes administradoras de agua y los tanques, sombra para los materiales y las facilidades para hacer el concreto a pleno sol, y rociar los agregados con agua limpia no contaminada son algunos ejemplos. Otros medios incluyen pintar las ollas mezcladoras del camión y los silos de cemento de color blanco para reducir la ganancia de calor.

El uso de cemento caliente debe evitarse, aunque a veces se cita la temperatura relativamente alta de 77°C como el límite máximo. Puede notarse que todos estos medios limitan la ganancia de calor en el concreto, y en sus ingredientes que por consiguiente pueden mantener mejor la temperatura del concreto, no más alta que las temperaturas del ambiente.

Consecuentemente, estos medios se usan principalmente junto con otros medios que son capaces de bajar la temperatura del concreto por debajo de las temperaturas del ambiente. Estos incluyen el uso de materiales frescos, y en particular, el uso de agua fría o de hielo triturado.

7.4 *Uso de Agua Fría*

La temperatura inicial del concreto, que es provocada por el uso de agua fría, puede estimarse por la siguiente ecuación de equilibrio de calor asumiendo de que el calor específico de los sólidos en la mezcla es el mismo = 0.22:

$$T_{\text{conc}} = \frac{0.22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w}{0.22 (W_a + W_c) + W_w} \quad (7.1)$$

donde T_{conc} , T_a , T_c , y T_w son las temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) del concreto, agregados, cemento y agua, respectivamente; W_a , W_c y W_w son los pesos (kg) de los agregados, cemento y del agua, respectivamente.

Sustituyendo en $a = W_a / W_c$ (relación agregado-cemento) y $w = W_w / W_c$ (relación agua-cemento), y asumiendo que el calor específico de los sólidos es 0.2, La ecuación anterior en una forma simplificada:

$$T_{\text{conc}} = \frac{T_c + a T_a + 5w T_w}{1 + a + 5w} \quad (7.2)$$

En la práctica, el agua puede enfriarse a 5°C . Considerado una mezcla ordinaria, donde $a = 6$ y $w = 0.6$, la estimación de la temperatura del concreto es de 22.5, 26 y 29.5°C , cuando el cemento y las temperaturas de los agregados son de 30, 35 y 40°C , respectivamente (Fig. 7.2). Alternativamente para bajar la temperatura del concreto a 1°C , la temperatura del agua tiene que ser bajada a 3.3°C . Puede concluirse que al usar agua fría puede reducirse la temperatura del concreto a 10°C . Sin embargo, en la práctica, la máxima reducción de la temperatura del concreto que puede ser obtenida usando agua fría, aproximadamente a 6°C .

El agua fría puede lograrse a través de refrigeración mecánica, uso de hielo molido y también inyectando nitrógeno líquido en el tanque de agua. Cosas así son y producen sólo una reducción moderada de la temperatura del concreto, como se mencionó previamente una reducción máxima de 6°C. De hecho incluso un máximo más bajo de 3-5°C a veces se menciona.

7.5 *Uso de Hielo.*

Una reducción extensa en la temperatura inicial de la mezcla fresca se puede mantener usando hielo como parte del agua de la mezcla. El hielo se introduce en la mezcla en forma triturada, corta o hielo afilado, y deritiéndose durante la operación del mezclado el calor se absorbe a una velocidad de 79.6 kcal/kg (335 J/g), y por eso baja la temperatura del concreto. Asumiendo que la temperatura del hielo es de 0°C, y usando la misma anotación como en la ec. (7.1), la temperatura del concreto se estima por (W_i que es el peso del hielo):

$$T_{\text{conc}} = \frac{0.22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w - 79.6 W_i}{0.22 (W_a + W_c) + W_w + W_i} \quad (7.3)$$

Substituyendo $a = W_a / W_c$, $w = (W_i + W_w) / W_c$ y $x = W_i / (W_i + W_w)$, y asumiendo, de nuevo que el calor específico de los sólidos es 0.2, la ec. (7.3) toma la forma siguiente:

$$T_{\text{conc}} = \frac{T_c + aT_a + 5w(T_w(1-x) - 79.6x)}{a + 1 + 5w} \quad (7.4)$$

para facilitar un mezclado más rápido con los ingredientes del concreto, alguna parte del agua en la mezcla, normalmente no menos del 25%, se agrega como agua líquida. Es decir, la cantidad de agua que se agrega en forma de hielo normalmente no excede el 75% del total. Considerando valores moderados del 50%, y la mezcla previamente investigada ($a = 6$ y $w = 0.6$), se encuentra resolviendo la ec. (7.3) o en la ec. (7.4), la temperatura del concreto estimada para $T_a = T_c = T_w = 30, 35$ y 40°C es de 13.5, 17.6 y 22°C , respectivamente (Fig. 7.3). Esto bajo condiciones consideradas, el uso de hielo puede reducir la temperatura del concreto a 18°C , y una reducción más alta puede lograrse si una gran parte de agua en la mezcla (75%) se introduce en la mezcla en forma de hielo. De nuevo, al parecer en la práctica una considerable reducción no puede ser ejecutada, y el máximo obtenido considerado es alrededor de los 11°C .

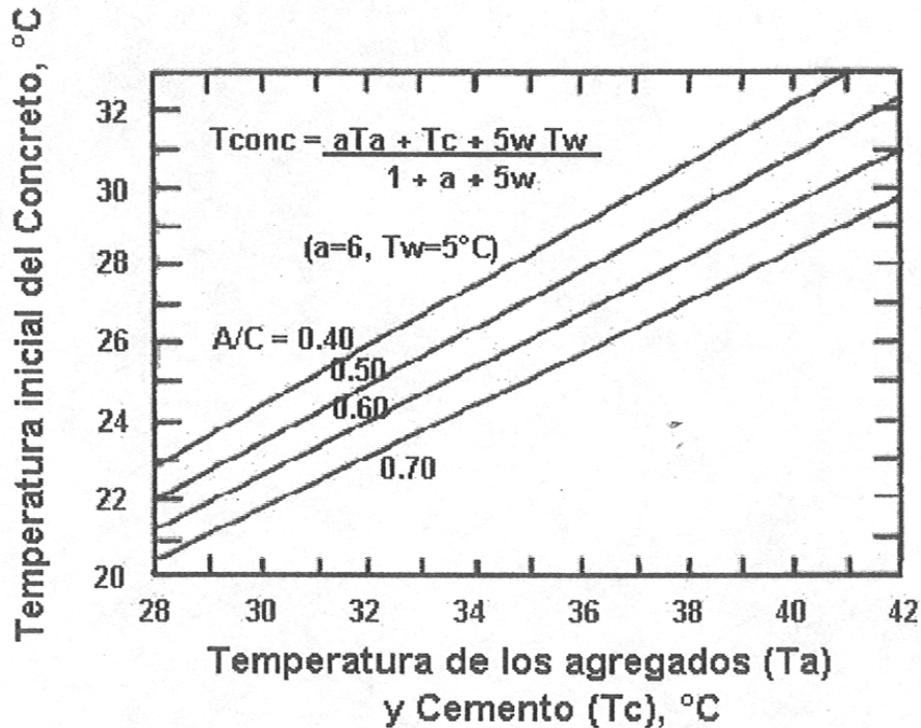


Fig. 7.2. Solución gráfica de la ecuación (7.2) en la relación agregado-cemento $a = 6$ y la temperatura del agua mezclada $T_w = 5^\circ\text{C}$

El uso de hielo es condicional en la disponibilidad de una fuente conveniente y fiable de hielo. Cuando se proporciona un bloque de hielo, el almacenamiento refrigerado debe proporcionarse así como los medios mecánicos convenientes para aplastar el hielo. La necesidad puede evitarse si el hielo se produce en el sitio en forma de hojuelas. De nuevo, el uso de hielo para bajar la temperatura del concreto es un procedimiento costoso y sólo puede ser económico bajo condiciones específicas.

7.6 Uso de Agregados Fríos.

El agregado grueso constituye el 50% de los ingredientes del concreto y se espera, que el uso de agregados gruesos fríos trae consigo una reducción considerable en la temperatura del concreto. De nuevo, este efecto puede ser estimado cuantitativamente resolviendo la ec. (7.1). Considerado una mezcla típica en la que $W_a = 1800$ Kg. (1200 Kg. para el agregado grueso y 600 Kg. para el agregado fino), $W_c = 330$ Kg. y $W_w = 200$ Kg., la temperatura del concreto es estimada para $T_c = T_w = 30^\circ\text{C}$ y $T_a = 20^\circ\text{C}$, para el agregado grueso sólo, será de unos 26°C . Para reducir la temperatura del concreto alrededor de 1°C , la temperatura del agregado grueso debe ser reducida 2.5°C . Una manera de refrescar el agregado es rociando o inundándolo con agua fría. Este procedimiento requiere por supuesto, de grandes cantidades de agua limpia e incontaminada que no siempre está disponible en áreas áridas calientes.

Al mojar el agregado se involucra la presencia de humedad libre, que permite una reducción apropiada en la cantidad de agua que se agrega a la mezcla. Soplando aire a través del agregado húmedo, debido al aumento de la evaporación, provocará una reducción mayor en la temperatura del agregado. Si el aire frío se usa, una reducción extensa puede lograrse, y la temperatura del agregado puede bajar hasta los 7°C. Refrescando a través de aire es un funcionamiento costoso que puede justificarse sólo bajo condiciones específicas.

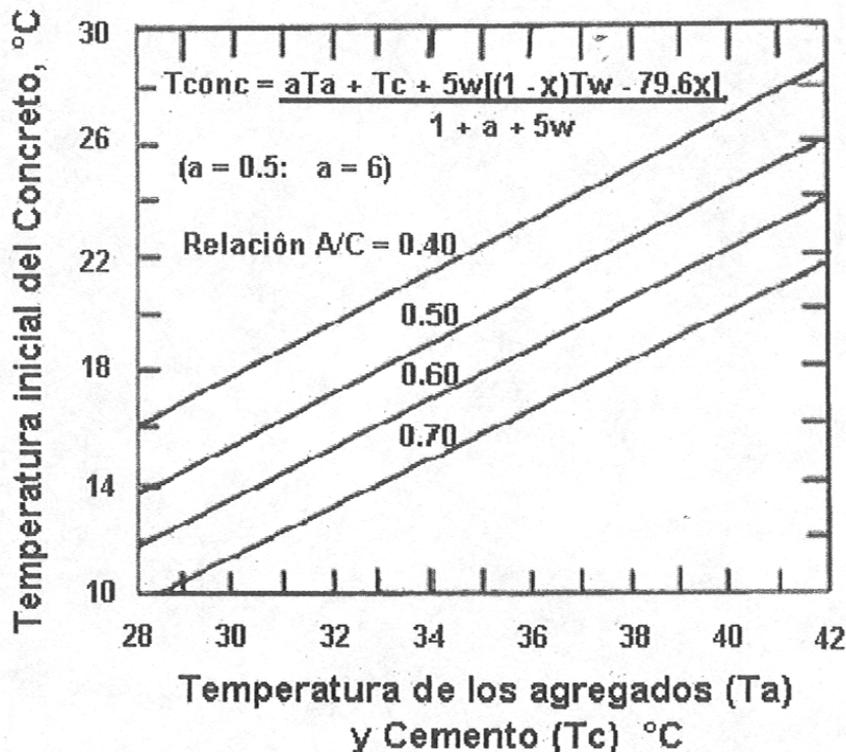


Fig. 7.3. Solución gráfica de la ec. (7.4) para agregados y para una proporción de cemento $a = 0.6$ y sustituyendo hielo por un 50% del total del agua en la mezcla ($x = 0.50$).

Otro método para refrescar el agregado grueso involucra el uso de nitrógeno líquido. En este método el agregado se rocía con nitrógeno líquido y el gas frío resultante es arrastrado a través del agregado por un abanico. Se exige para el uso de este método, la temperatura de los agregados secos sea por debajo de los -18°C.

Puede decirse que el nitrógeno líquido también puede usarse para bajar la temperatura del concreto, inyectándolo directamente en la mezcla fresca. Se ha dicho que este método puede ser eficaz bajando las temperaturas del concreto sin adversamente afectar sus propiedades.

7.7 Retemplando

Retemplar se define como la adición de agua y remezclado del concreto o mortero que han perdido bastante trabajabilidad para volverse no manejable o poco sólido. Sin embargo, en práctica, una definición más amplia se adopta normalmente, para incluir adiciones tardías de superplastificantes. Al restaurar el revenimiento requerido (trabajabilidad) de la mezcla de concreto, retemplándola, es particularmente útil cuando el periodo de acarreo es largo y las condiciones del clima son extremas, además se considera que el uso de mezclas húmedas con un revenimiento inicial alto, es conveniente para un periodo de entrega corto y condiciones de clima moderado.

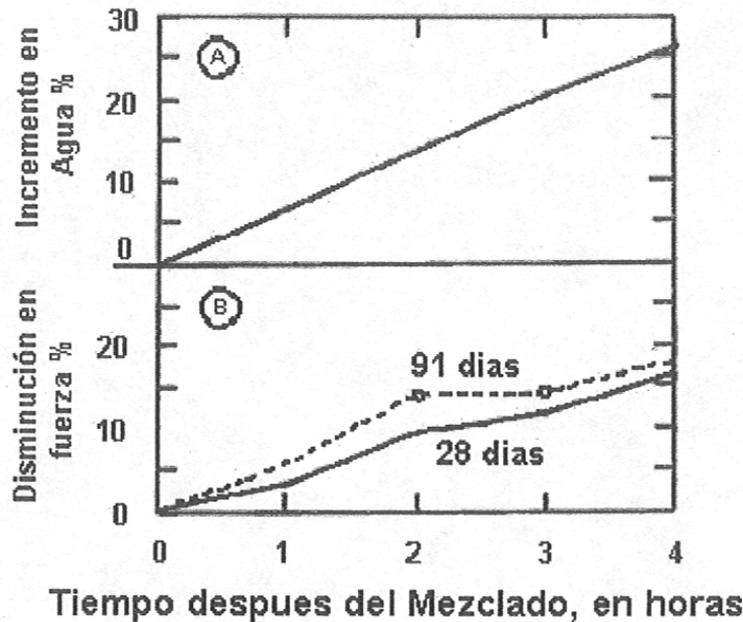


Fig. 7.4. Efecto del tiempo transcurrido después del mezclado (A) el aumento en la cantidad de agua requerida para reemplar a un revenimiento inicial de 75 mm y, (B) la disminución resultante de la fuerza de compresión.

7.8 Retemplando con Agua.

En este método, se prepara el concreto con el revenimiento requerido y es reemplado más tarde con una cantidad de agua que simplemente es suficiente para restaurar el revenimiento a su nivel inicial. Las propiedades del concreto y su calidad en general, determinada bajo las mismas condiciones, por la relación A/C. La adición de agua para reemplar aumenta esta relación, y por eso la fuerza del concreto, por ejemplo, es adversamente afectada.

Este efecto se demuestra en la Fig. 7.4, para concretos mezclados y retemplados en el rango de la temperatura ambiente de 25-38°C (temperatura del concreto 25-33 °C). También puede notarse que la cantidad de agua requerida para reemplar incrementa con el aumento del tiempo después del mezclado. El efecto adverso de reemplar con agua en las propiedades del concreto puede mostrarse de dos maneras. En la primera, el agua se agrega simplemente junto con una cantidad correspondiente de cemento que se requiere para guardar la relación A/C. La segunda, la cantidad adicional de agua para reemplar se permite para la selección de las proporciones de la mezcla y el volumen de cemento es determinado, en el primer caso, para cuando el agua se agrega para reemplar, la relación requerida de A/C no se excede. Esto no siempre es fácil de lograr porque una estimación justa de la cantidad de agua necesaria para reemplar debe conocerse en la fase del diseño de la mezcla. Puede notarse que ambas maneras de compensar el efecto adverso del agua para reemplar, en las propiedades del concreto se involucra el aumento del contenido de cemento. Esto puede juzgarse indeseable debido al aumento asociado en la evolución de calor que después agrava el problema, y también porque el alto contenido de cemento incrementa la contracción, y por eso el riesgo de agrietamiento. El uso de aditivos convencionales (tipos A y D) o superplastificantes, es beneficioso en este aspecto porque no involucra un alto volumen de cemento. Es más, la fuerza del concreto puede ser afectada favorablemente, en particular se usan más dosis de las recomendadas. Estos efectos benéficos de aditivos se refleja en la Fig. 7.4, en la cantidad combinada de agua requerida para producir un revenimiento inicial de 100 mm y la cantidad requerida para reemplar con el fin de restaurar el revenimiento a su nivel inicial. Puede verse que el uso de un aditivo reductor de agua resulta con una reducción en la cantidad total del agua, y esta reducción incrementa con el aumento en la cantidad de aditivo a usar.

La reducción en la cantidad total de agua, baja la relación A/C, y la fuerza se espera que incremente. Este caso como puede notarse en la Fig. 7.5, debe comprenderse que cuando los aditivos reductores de agua se usan, la cantidad de agua requerida para reemplar no es menos que la cantidad requerida cuando ningún aditivo es usado. De hecho, en ambos casos la misma cantidad es necesaria, y la cantidad reducida del total se debe a la cantidad reducida que se necesita para dar un revenimiento inicial a la mezcla. Esto puede concluirse con los datos presentados en la Fig. 7.6 que relaciona a las mezclas con el mismo volumen de cemento y el mismo revenimiento inicial de 90 mm que fue reemplado 2h después del mezclado.

Puede notarse en la Fig. 7.6, que al reemplar se aumenta la relación A/C por 0.06 en todas las mezclas, a una excepción de la mezcla que contiene superplastificantes en la que el aumento es ligeramente mayor a 0.07. El volumen de cemento en todas las mezclas es igual, el mismo aumento en la relación A/C implica que la misma cantidad de agua fue usada para reemplar todas las mezclas. Como la relación inicial A/C de las mezclas con contenidos de aditivos fue menor que la relación A/C de la mezcla de referencia, y el incremento en la relación A/C al reemplar fue el mismo, la relación A/C del mezclado que contiene aditivos permanece baja. De acuerdo con los datos de la Fig. 7.5, se espera que las últimas mezclas exhibirán una fuerza más alta que la mezcla de referencia.

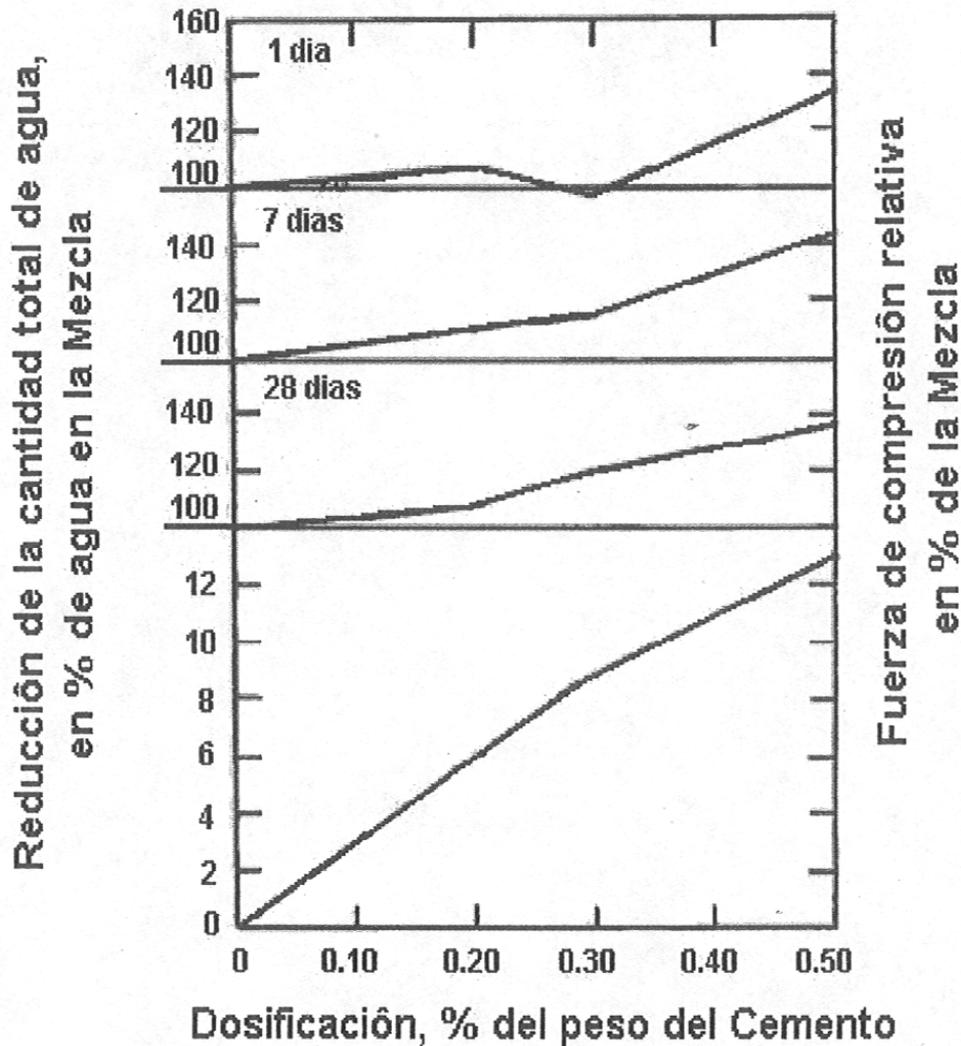


Fig. 7.5. Efecto de aditivo tipo A en la reducción de la cantidad total de agua mezclada y la fuerza de compresión resultante. Revenimiento básico 100 mm, temperatura 30°C. Retemplado 1 h después del mezclado.

Se menciono anteriormente que los aditivos reductores de agua normalmente aceleran la proporción de la pérdida del revenimiento. No obstante, el uso de tales aditivos en mezclas retempladas son considerados favorables por que dicho uso no envuelve a una fuerza reducida ni a un volumen de cemento alto. Es más, cuando se consideran temperaturas más altas, el uso alto en la cantidad de aditivos reductores de agua puede proporcionar una solución práctica a la cantidad aumentada de agua necesaria para retemplar.

7.9 Retemplando con Superplastificantes.

Los superplastificantes incrementan considerablemente la fluidez del concreto fresco y pueden usarse como tal, de hecho se usan para retemplar. En la mayoría de los casos los superplastificantes aumentan la proporción de la pérdida del revenimiento, pero por otro lado, su uso no aumenta ni la relación A/C ni el volumen de cemento. Los superplastificantes pueden usarse para retemplar o para la superplasticidad del concreto, para retemplar el concreto donde ningún superplastificante es inicialmente agregado así como para retemplar el concreto en el que se agregaron superplastificantes a la mezcla original. En último caso los superplastificantes pueden utilizarse para reducir la cantidad de agua en la mezcla, o el contenido de cemento, o ambos.

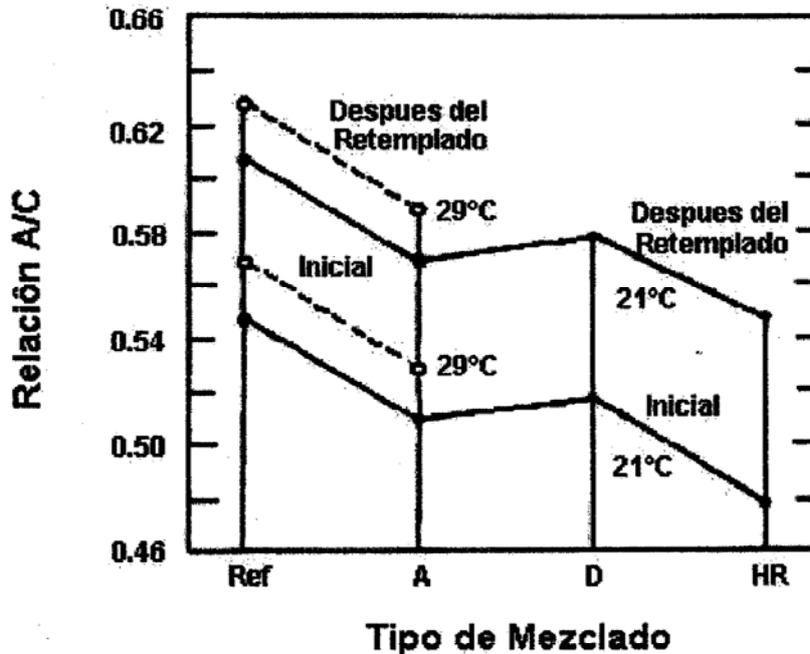


Fig. 7.6. Efecto de los aditivos reductores de agua en la relación A/C de mezclas retempladas. Revenimiento inicial de 90 mm, retemplado 2h después del mezclado.

Se espera que la cantidad (dosificación) de superplastificante requerido para retemplar (para restaurar el revenimiento a su nivel inicial) también aumentará con la temperatura. Los datos presentados en la Fig. 7.7, por ejemplo, indican que el efecto de la temperatura en la cantidad de superplastificante requerido para retemplar depende de la relación A/C del concreto.

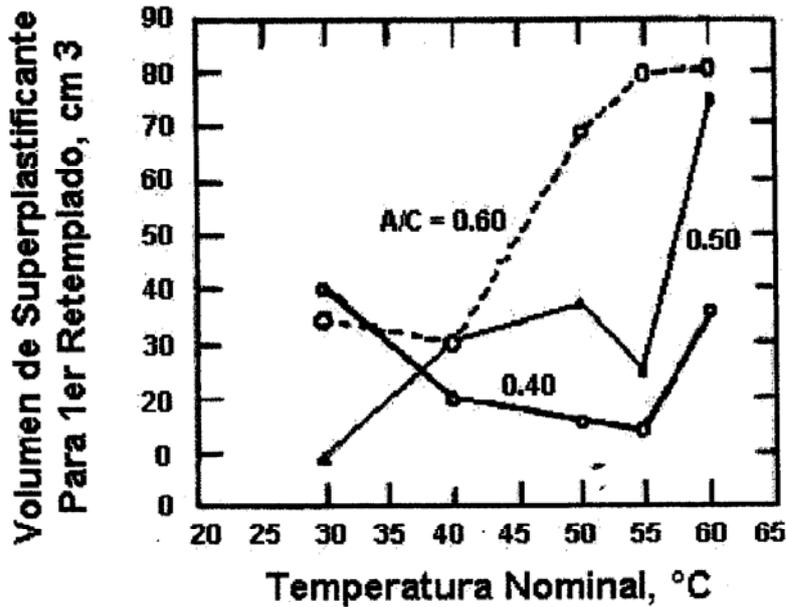


Fig. 7.7. Efecto de la temperatura en la dosificación de superplastificante requeridos para restaurar el revenimiento y retemplar al nivel inicial de 100 mm.

Es decir, la cantidad de superplastificante requerida para retemplar permanece igual, y no relaciona a la temperatura, cuando la relación A/C era 0.4. Cuando la relación A/C era 0.5, esta se volvió dependiente de la temperatura mas bien a un nivel alto de temperatura de 55-60°C, y sólo la alta relación A/C de 0.6 se hizo dependiente de la temperatura e incremento en el último rango de 40-60°C. Por otro lado, los datos presentados en la Fig. 7.8 muestran la tendencia inversa, que la dosificación requiere de la temperatura. Esta tendencia aunque es evidente, en un rango de temperatura bajo de 7-20°C, aparentemente es difícil en un alto rango de 20-30°C. Notando que los datos de la Fig. 7.7, relacionan a un rango de temperatura mucho más alto de 3°-60°C, puede definirse que los datos de las dos figuras en cuestión no son comparados y, por consiguiente, no son necesariamente contradictorios. Como se mencionó antes la naturaleza exacta del efecto de la temperatura en la dosificación requerida para retemplar no está clara.

No obstante, se asume que una dosificación mayor de superplastificante es requerida bajo las altas temperaturas. El concreto puede ser más de una vez retemplado. La eficacia de los superplastificantes, sin embargo, disminuye cuando el número de retemplados se incrementa. Es decir, un revenimiento más bajo se alcanza, y el tiempo en donde el concreto permanece trabajable se vuelve corto, si la misma dosificación se repite al retemplar (Fig. 7.9).

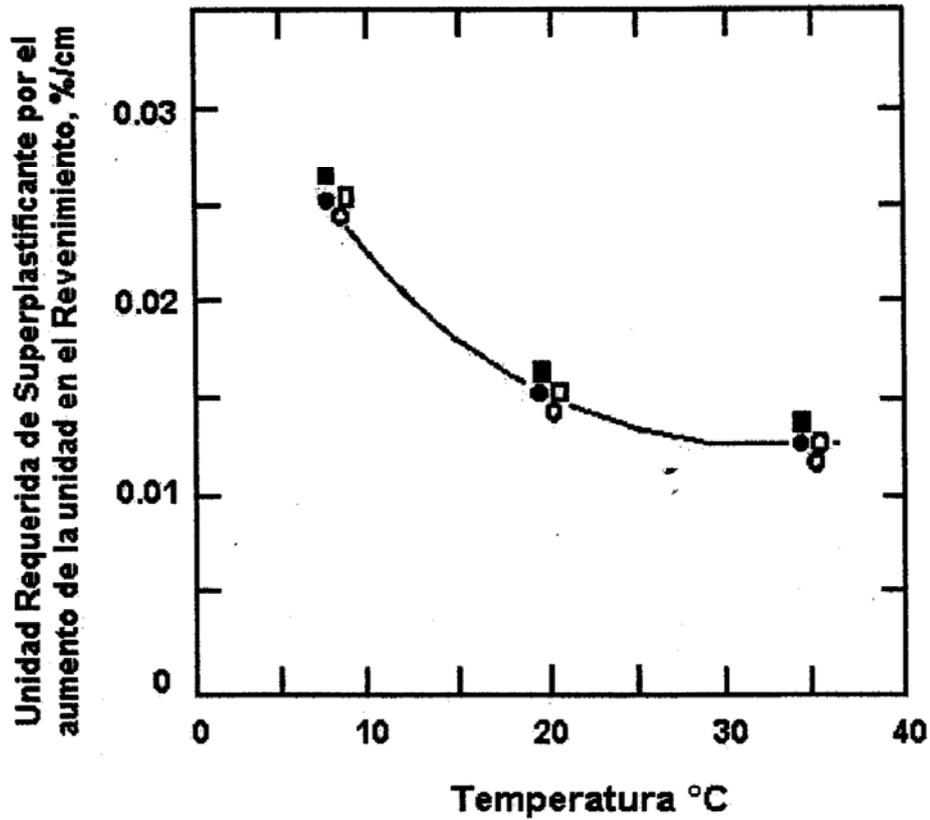


Fig. 7.8. Efecto de la temperatura en la dosificación de superplastificante requiriendo aumentar el revenimiento de 80 a 180 mm.

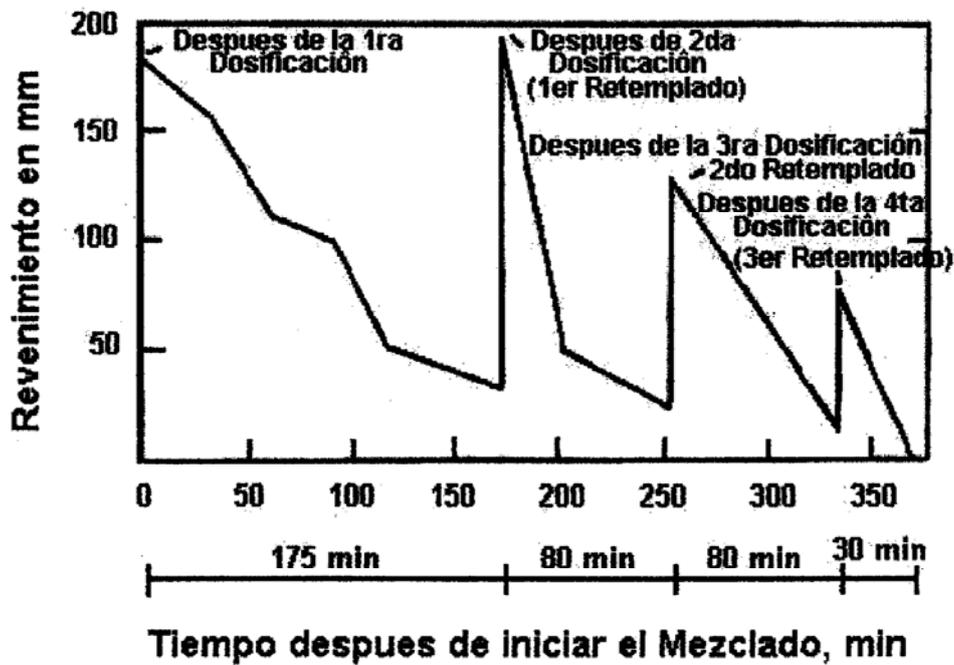


Fig. 7.9. Efecto de repetidos retemplados con superplastificante en el revenimiento del concreto.

Esta observación es apoyada por los datos presentados en la Fig. 7.10(A). Esta parte de la figura presenta el efecto del tiempo transcurrido, de la mezcla inicial para retemplar, con una pérdida del revenimiento en un concreto retemplado con un 0.5% de un superplastificante. En el caso considerado, el reemplado se llevó a cabo después de 30, 60 y 90 min, y puede verse en acuerdo con los datos de la Fig. 7.9, el efecto del 0.5% de la dosificación disminuyó con el incremento del tiempo de reemplado. Semejante disminución no se observó cuando una dosificación alta del 3% se usó y, de hecho, la dosificación más alta también era más eficaz aumentando el revenimiento del concreto (Fig. 7.10(B)). Puede concluirse que una dosificación alta de superplastificante puede usarse para neutralizar el efecto de disminución de tiempo en la efectividad del reemplado al retemplar. Semejante aumento de dosificación debe ejercerse, con cuidado debido a que en un cierto nivel puede darle al concreto fresco una excesiva tendencia a la segregación.

Se menciono antes que el uso de superplastificantes para retemplar no involucra un aumento en la relación A/C, y en algunos casos se puede facilitar una reducción en la última relación. Considerado el posible efecto de la relación A/C se esperara que las propiedades del concreto reemplado serán esencialmente iguales que las propiedades del mismo concreto sin retemplar. Se presentan datos que relacionan el efecto de retemplar con la fuerza de compresión en la Fig. 7.11. y puede verse que de hecho al retemplar, adversamente afecta la fuerza a los 7 días. Este efecto, sin embargo, es menor (una reducción del 5% para concreto reemplado dos veces) y virtualmente desaparece a la edad de 28 días. Pruebas relatan que la fuerza a flexión, fuerza de tensión, modulo de elasticidad y velocidad de pulso llevan a la misma conclusión, el reemplado no afecta significativamente las propiedades del cemento endurecido.

Debe enfatizarse de nuevo que las mezclas son comercialmente producidas y aunque obedecen las mismas normas, pueden diferir considerablemente en su composición y sus propiedades. La selección de aditivos para un uso específico debe estar basado en la experiencia anterior o en datos de las pruebas pertinentes para usos futuros.

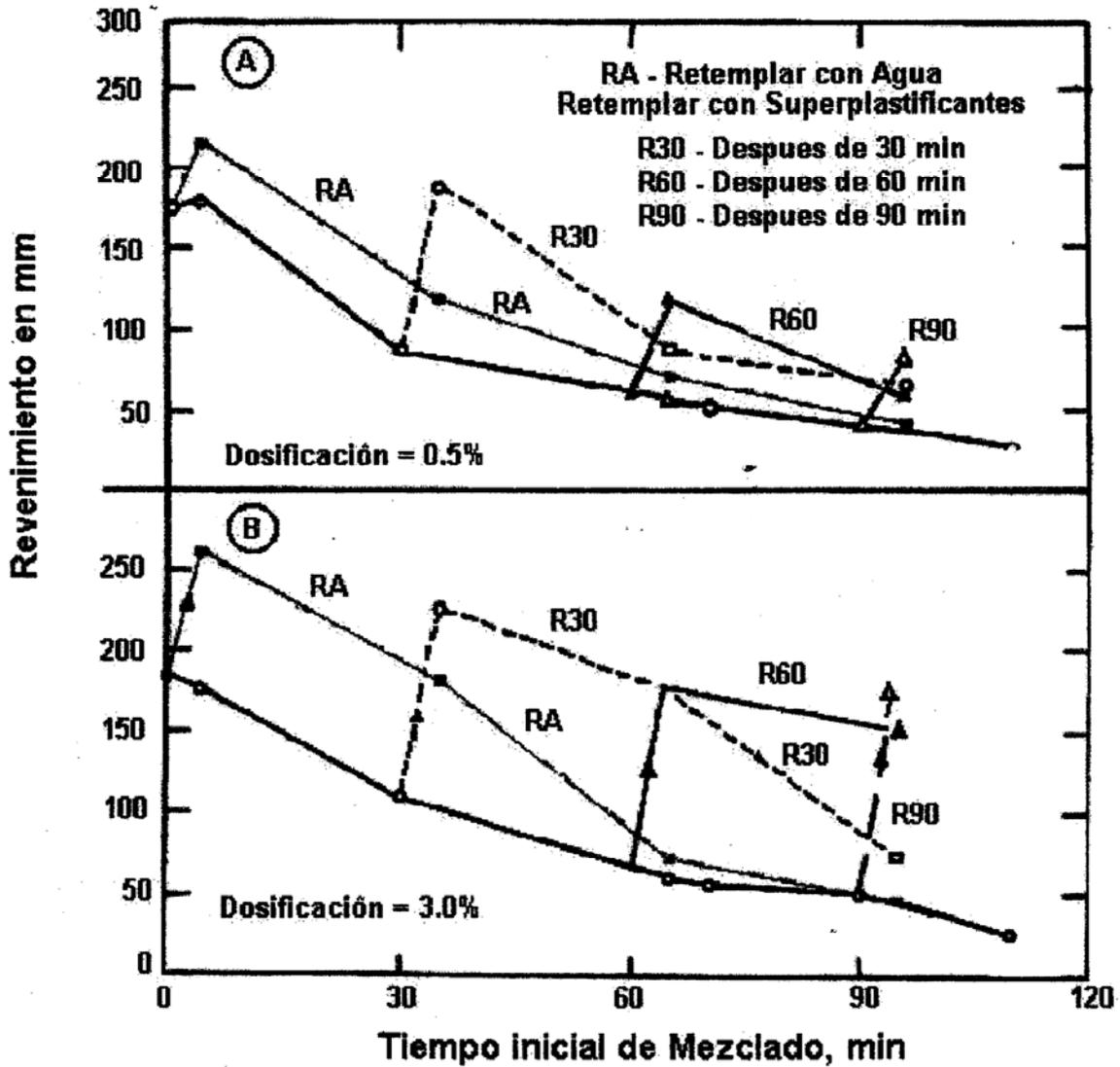


Fig. 7.10. Efecto de retemplar con tiempos diferentes, con dosificaciones diferentes de superplastificantes con pérdida del revenimiento.

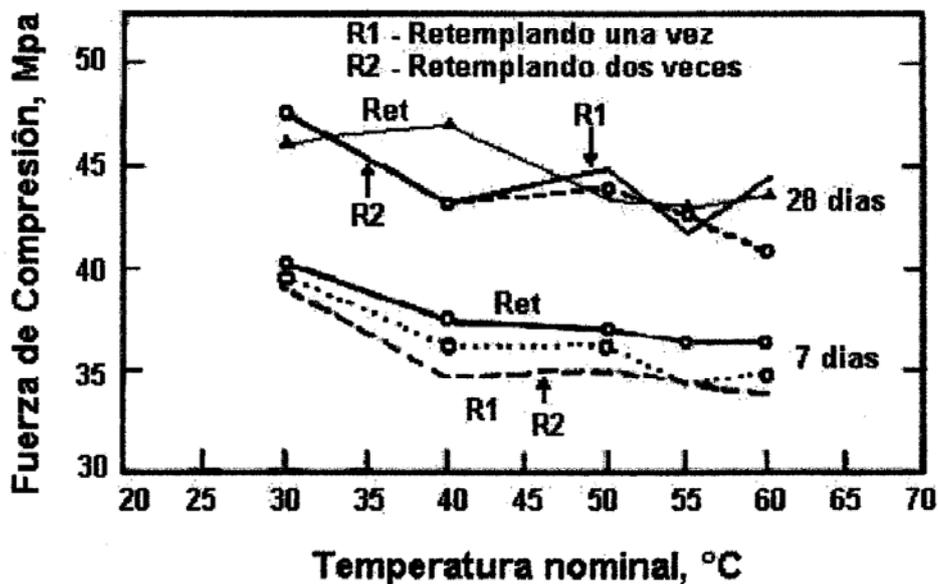


Fig. 7.11. Efecto de retemplar repitiendo con plastificantes en la fuerza de compresión del concreto con una relación A/C de 0.40. R1-retemplando una vez, R2-retemplando dos veces.

Capítulo VIII

CAMBIOS VOLUMETRICOS

8.1. INTRODUCCION

El concreto no es un material volumétricamente estable, pues en el transcurso del tiempo experimenta cambios de volumen por causas físicas y químicas. Las de origen químico (independientemente de algunos cambios menores derivados de la hidratación del cemento) generalmente se producen como consecuencia de reacciones que se generan interna o externamente, y cuyas manifestaciones ordinarias son expansiones locales que tienden a destruir el concreto. Debido a ello, no se les considera como parte del comportamiento natural del concreto, sino más bien como eventos ocasionales que deterioran el concreto prematuramente, por lo cual su tratamiento se describe más adelante, al mencionar los factores que afectan la durabilidad del concreto.

Los cambios de volumen de origen físico, pueden obedecer a dos tipos de acciones sobre el concreto: 1) los de carácter mecánico, específicamente las cargas, y 2) los agentes fenomenológicos, entre los que destacan por sus efectos la humedad y la temperatura. Los cambios de forma y dimensiones del concreto, resultantes de los esfuerzos ocasionados por las cargas, se identifican normalmente como deformaciones. De este modo, los cambios de volumen propiamente dichos son los que se manifiestan en el concreto por efecto de los agentes fenomenológicos. Los cambios volumétricos del concreto pueden ocurrir como expansiones o contracciones; si el elemento de concreto en cuestión tiene plena libertad para cambiar de volumen (como puede ser el caso de un espécimen de tamaño reducido) el cambio se produce sin generar esfuerzos. Sin embargo, en la práctica esto no sucede así en los elementos estructurales, que casi siempre tienen restricciones para expandirse o contraerse libremente, de manera que en estas condiciones una expansión genera esfuerzos de compresión y una contracción los produce a tensión. Debido a la reducida capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tensión, las contracciones son los cambios de volumen más inconvenientes porque se traducen en agrietamientos, al generar esfuerzos que sobrepasan la resistencia a tensión del concreto.

En la tabla siguiente se resumen los principales cambios volumétricos que pueden ocurrir en el curso de la vida de un concreto, según las condiciones de exposición a que se halle sometido, y se incluyen los motivos que los propician y su forma usual de manifestarse.

CAMBIOS VOLUMÉTRICOS DEL CONCRETO			
ETAPA	EXPOSICION	CAUSA	MANIFESTACION
Antes del fraguado (concreto fresco) y durante el fraguado (concreto en rigidización)	Al aire	Asentamiento, Sangrado y pérdida inicial de agua	Contracción Plástica
	Sumergido	Efectos físicos y químicos de la hidratación inicial del cemento Consumción de agua por la hidratación del cemento	Expansión postsangrado Contracción autógena
Después del fraguado (concreto en curso de endurecimiento y ya endurecido)	Al aire	Continuación de la pérdida de agua	Contracción por secado
		Generación de calor interno por la hidratación del cemento	Expansión térmica inicial al acumularse el calor, y contracción posterior al disiparse
		Variaciones externas de temperatura (medio ambiente y otras causas)	Expansión al calentarse y contracción al enfriarse
		Acción del bióxido de carbono atmosférico	Contracción por carbonatación
	Sumergido	Consumción de agua por la hidratación del cemento Absorción de agua por el gel de cemento	Contracción autógena Hinchamiento por saturación

**Principales cambios volumétricos que suelen ocurrir en el
Concreto fresco y endurecido**



Los agrietamientos en el concreto pueden ocurrir antes del endurecimiento, cuando el concreto alcanza la fase en la que no es plástico y por consiguiente, no puede haber acomodamientos en el volumen. De acuerdo con los agrietamientos resultantes se conocen como grietas del pre-endurecimiento o contracción plástica. Generalmente, las grietas del pre-endurecimiento ocurren y se desarrollan unas horas después de que el concreto se ha colocado. Los mecanismos involucrados pueden ser diferentes y de acuerdo con la distinción se hace entre los agrietamientos de contracción plástica y los agrietamientos plásticos.

8.2 CONTRACCION PLASTICA

Cuando en el concreto fresco toma lugar la contracción por secado, está contracción en la fase del pre-endurecimiento es conocida como contracción plástica, y se distingue de la contracción en la fase del endurecimiento y se conoce como contracción por secado. La contracción plástica puede causar agrietamiento durante las primeras horas después de que el concreto se ha colocado, normalmente cuando su superficie se pone seca. Las grietas son caracterizadas por un modelo (Fig.8.1) pero a veces se desarrollan como grietas en diagonal de aproximadamente 45° a los bordes de la losa. En otro momento las grietas pueden desarrollarse a lo largo de la armadura, particularmente cuando la armadura esta cerca de la superficie. El ancho de las grietas varía y puede alcanzar unos milímetros. Semejantemente esa longitud varía de unos milímetros a 1 metro más. Normalmente, las grietas se estrechan rápidamente encima de la superficie pero en casos extremos, la grieta puede penetrar la profundidad total de la losa.

El secado, y la contracción plástica asociado con el concreto fresco, se describe esquemáticamente en la Fig. 8.2. Cuatro fases se distinguen:

Etapa I – La proporción del sangrado es mayor que la proporción del secado. Por consiguiente, la superficie del concreto permanece húmeda y sin ninguna contracción.

Etapa II – La proporción del secado es mayor que la proporción del sangrado. La superficie se seca y la contracción empieza a tener lugar. Ningún agrietamiento ocurre porque el concreto permanece plástico para acomodar los cambios de volumen. El secado y la contracción correspondiente, proceden bruscamente a una proporción constante.

Etapa III – El Concreto se pone quebradizo, la restricción a la contracción induce fuerzas tensoras en el concreto el cual se agrieta, cuando su fuerza tensora es más baja que las fuerzas tensoras inducidas.

Etapa IV – El Concreto fragua y la contracción por secado empieza.



Fig. 8.1. Típica contracción plástica en una losa de concreto.

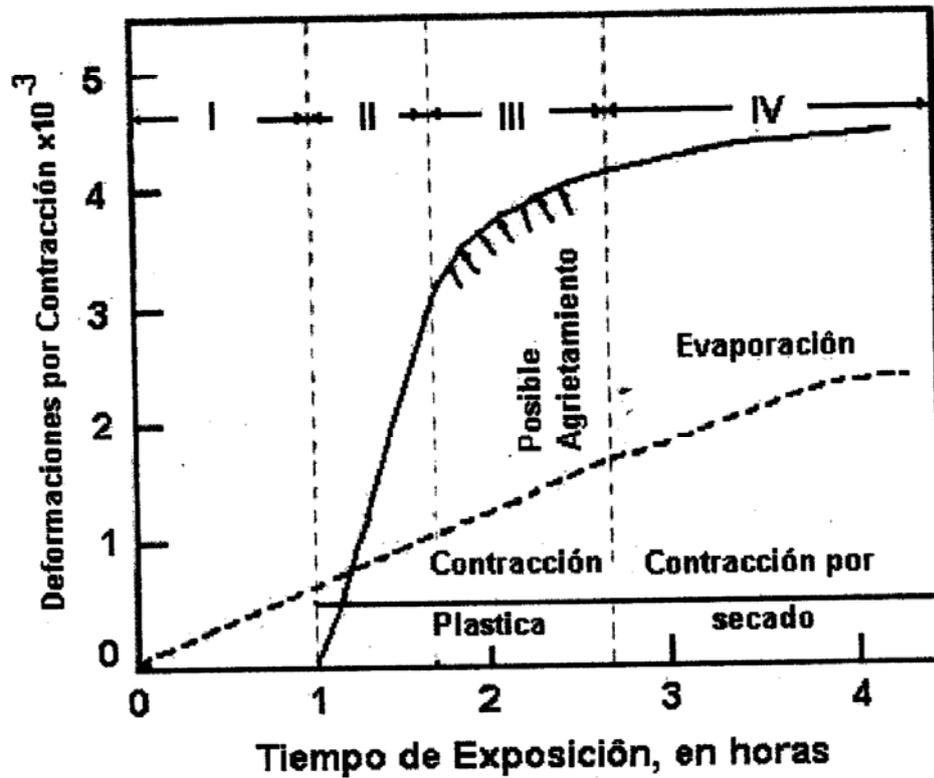


Fig. 8.2. Descripción Esquemática de la contracción a temprana edad en el concreto.

Se menciono anteriormente que el secado temprano en el concreto fresco resulta con una contracción plástica que puede causar grietas cuando las fuerzas de tensión inducidas exceden la fuerza a tensión del concreto en un tiempo considerado. Tiene que ser explicado por qué, el secado del concreto provoca una contracción plástica. Se ha dicho que el mecanismo involucrado de tensión capilar que a su vez, induce fuerzas de compresión en el concreto fresco, y por eso las causas de contracción y su encogimiento plástico. En la fase inicial el concreto está todavía plástico y puede ser consolidado por la presión resultante de aquí la contracción plástica ocurre. Este mecanismo es compatible con la observación donde la contracción plástica empieza cuando la superficie del concreto se pone seca, y se apoya por los datos experimentales de la Fig. 8.3, que demuestran la relación esperada entre la contracción y la presión capilar. Sin embargo, en alguna fase, esta presión alcanza un máximo, y cae de repente y rápidamente. Este máximo a veces es conocido como un rompimiento de presión y se atribuye a la ruptura en la continuidad del sistema de agua en los capilares.

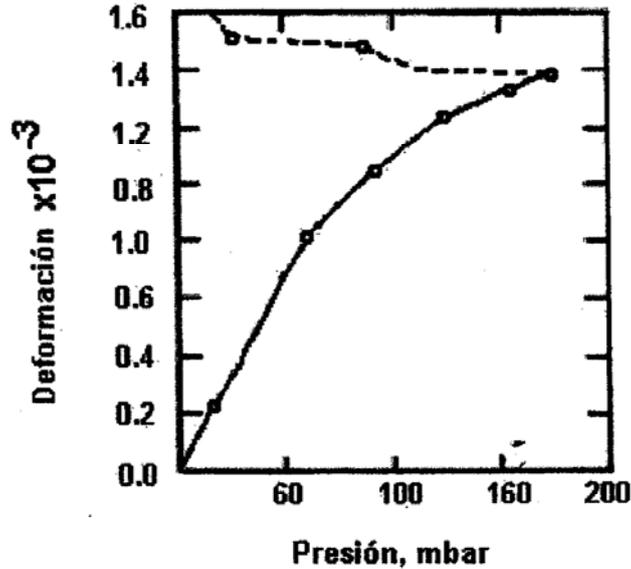


Fig. 8.3. La relación entre la contracción plástica y la presión capilar.

8.3. Factores que afectan la Contracción Plástica.

Se menciono en la sección anterior que la contracción plástica es atribuible a las fuerzas de tensión en el agua del capilar que se ponen activas cuando se forman meniscos en el agua en los capilares que están secándose. Puede mostrarse que la tensión máximo ocurre inmediatamente debajo de la superficie y es igual a $2 T/r$, donde T es la tensión de la superficie del agua y r es el radio de curvatura del menisco. La tensión en el agua aumenta con la disminución en el radio de curvatura del menisco, considerando que las últimas disminuciones bajan con la humedad relativa del ambiente. Se espera que la contracción plástica aumente con la intensidad de las condiciones del secado.

Se puede comprender que la disminución en el radio de curvatura, y el aumento asociado de la tensión en el agua del capilar, sólo puede proceder a un cierto punto porque el radio de curvatura no puede ser más pequeño que el del capilar. Al secar el capilar se vacía y la tensión es explicada por los datos experimentales de la Fig. 8.3. Una tensión máxima es alcanzada (rompimiento de presión), cuando el radio del menisco iguala al del capilar. Esta tensión capilar máxima, P_c es dada por la expresión siguiente:

$$P_c = k T S C / W$$

donde T es la tensión de la superficie del agua, S es el área de la superficie específica de partículas sólidas, la expresión $P_c = 0.26 T S \rho$, ρ es su densidad, C es el volumen de cemento, W es el volumen de agua, y k es la proporción de la densidad del agua a la del cemento. Se esperará que la presión capilar y su asociada contracción plástica aumente con el incremento en el contenido de cemento y su área específica, disminuyendo con un incremento en el volumen de agua.

8.4. Factores Medioambientales.

Entre los factores medioambientales que afectan el secado se incluye la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento. El efecto de estos factores es conocido, y se observa en la Fig. 8.4. En este aspecto puede notarse que el efecto de la humedad relativa, es el más dominante (parte A). El efecto de la velocidad del viento (parte B) es mayor que el efecto de la temperatura (parte C) pero todavía es más pequeño que el de la humedad relativa. En cualquier caso, la contracción plástica, se espera que incremente con un aumento en la temperatura y la velocidad del viento y disminuya con la humedad relativa, a través de los efectos de éstos factores medioambientales en la intensidad del proceso de secado.

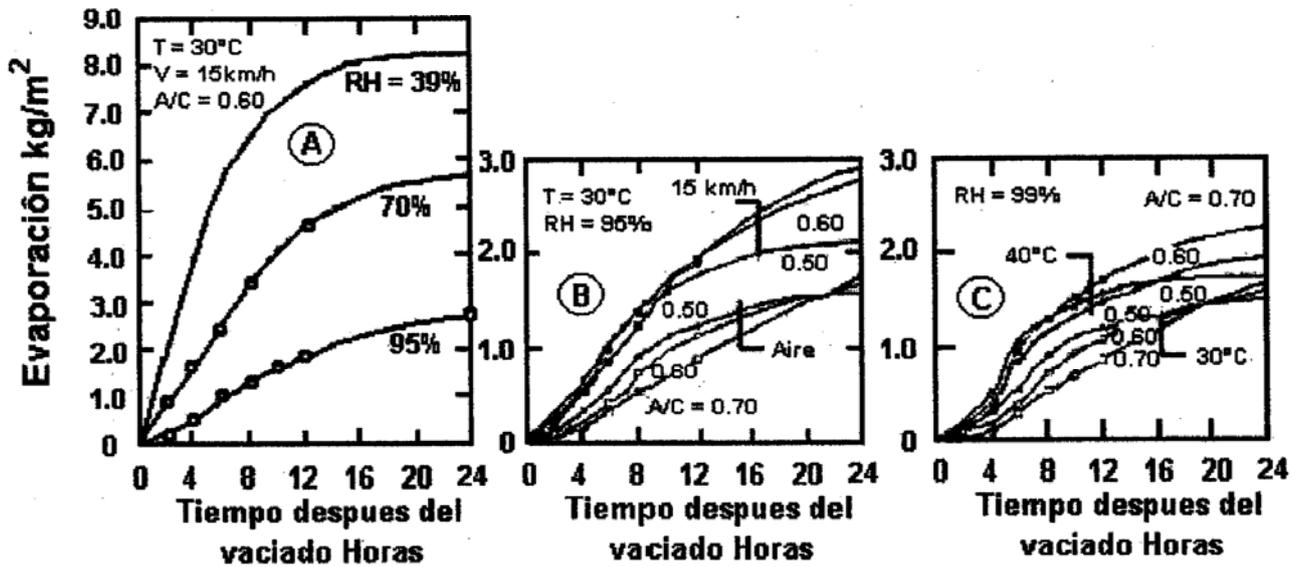


Fig. 8.4. Efecto de (A) la humedad relativa, (B) la velocidad del viento, y (C) la temperatura del ambiente en el secado del concreto fresco.

Sin embargo, en la práctica, la contracción plástica no necesariamente es la misma cantidad de agua que se pierde en el secado (Fig. 8.5). Datos experimentales entre la relación contracción plástica y la intensidad del secado en morteros de cemento, provocados por la exposición a diferentes condiciones medioambientales, se presenta en la Fig. 8.5, donde el secado es medido por la cantidad de pérdida de agua.

Puede notarse que la contracción aumenta con el incremento en la cantidad de agua perdida, y esta relación es esencialmente la misma para todas las condiciones consideradas expuestas.

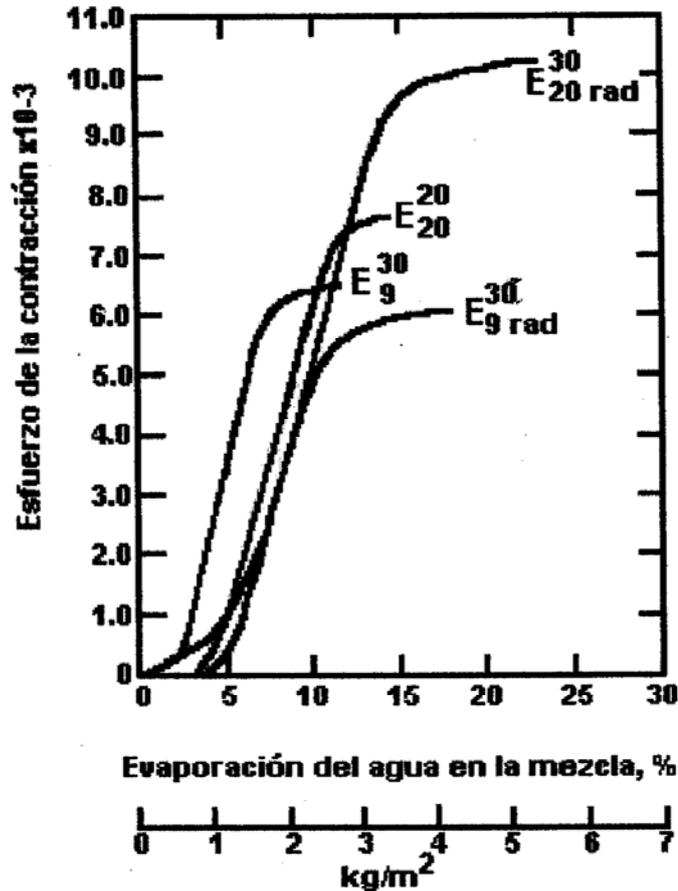


Fig. 8.5. Efecto de la evaporación en la contracción plástica en morteros de cemento (consistencia plástica de 550 kg/m^3 en cementos portland ordinarios (CPO)) sujeto a las diferentes condiciones expuestas. Los números superiores se refieren a la temperatura del aire en grados centígrados, y los números de abajo a la velocidad del viento en km/h. ' en rad' se denota la exposición a irradiación de IR.

Por otro lado, la última contracción (es decir la contracción total que ocurre hasta que el concreto esta fraguando) difiere considerablemente por las diferentes condiciones a las que esta expuesto. Pueden verse, por ejemplo, que un aumento en la velocidad del viento de 9 a 20 km/hr, aumentó la última contracción de 6 a 9.7 mm/m, (las mezclas E_{9rad}^{30} y a E_{20rad}^{30} ambas expuestas a la irradiación IR a 30°C), considerando que la cantidad de agua perdida permaneció igual a 20% del agua mezclada. Esta diferencia es atribuible al efecto simultáneo de los factores medioambientales en la proporción del endurecimiento y el tiempo de fraguado del concreto.

La última contracción no sólo depende de la intensidad del secado, sino también del endurecimiento de la mezcla y el tiempo que toma la mezcla en fraguar, es decir a una mezcla dura, el tiempo más corto de fraguado, y la más baja contracción esperada bajo las mismas condiciones. Las condiciones de las mezclas, E_{9rad}^{30} y E_{20rad}^{30} sólo se difirieron con respecto a la velocidad del viento. La proporción del secado de la mezcla E_{20rad}^{30} fue mayor que la de la mezcla E_{9rad}^{30} , pero el tiempo de fraguado de ambas mezclas fue esencialmente el mismo. Es decir, la mayor parte del secado de la mezcla E_{20rad}^{30} tuvo lugar a una edad más temprana, cuando la mezcla estaba menos rígida que la mezcla E_{9rad}^{30} . De aquí la última contracción más alta exhibida por la mezcla anterior. En otras palabras, la última contracción es determinada cuantitativamente por el efecto total de los factores medioambientales, en ambos la proporción del secado y la proporción del fraguado.

Puede esperarse que el uso de aditivos retardadores de fraguado aumenten la contracción plástica y esto es confirmado por los datos de la Fig. 8.6, que compara la contracción de morteros de cemento retardados y no-retardados. Un aumento en la contracción plástica, es asociado con el riesgo de un agrietamiento plástico. Por eso el uso de retardantes debe evitarse bajo las condiciones medioambientales, como en climas calientes y secos que favorecen una alta contracción plástica. Esta conclusión es importante en la práctica, porque el uso de retardantes a veces se recomienda bajo climas calientes y secos para neutralizar el efecto acelerado de dichas condiciones en la pérdida de depresión en el concreto fresco.

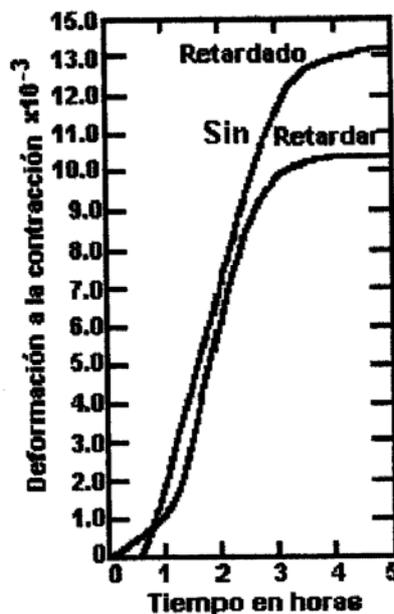


Fig. 8.6. Contracción Plástica en morteros de cemento retardados y no retardados de consistencia plástica y volumen de CPO de 550 kg/m^3 . La temperatura del aire es de 30°C , velocidad del viento de 20 km/h y irradiación de IR.

8.5. El Cemento y Agregados Minerales.

Anteriormente en la ecuación (8.1) para la presión del capilar, se espera que aumente con un incremento en el contenido de cemento y su finura (área de la superficie específica). Semejante tendencia se espera, porque a mayor contenido de cemento, mayor el número de puntos de contacto en los cuales los meniscos son formados y la tensión del capilar se vuelve activa. Similarmente a tamaño más pequeño de los granos de cemento, más pequeños los radios del menisco que se forman en los puntos de contacto. Por consiguiente, bajo las mismas condiciones, una tensión capilar mayor se espera con un aumento en el contenido del cemento y su fineza, y similarmente en la contracción plástica se espera un incremento. En este aspecto todos los ingredientes granulares de la mezcla de concreto deben ser considerados. El tamaño de las partículas de los agregados es mucho mayor que el de los granos de cemento, y su efecto en la tensión capilar no es de importancia (Fig.8.1). El contenido de cemento debe extenderse para incluir aditivos minerales los cuales tienen una área de superficie específica del mismo orden del cemento (fly-ash) o mayor (microsilica). Se demuestra el efecto del contenido de cemento en la contracción plástica en la Fig. 8.7.

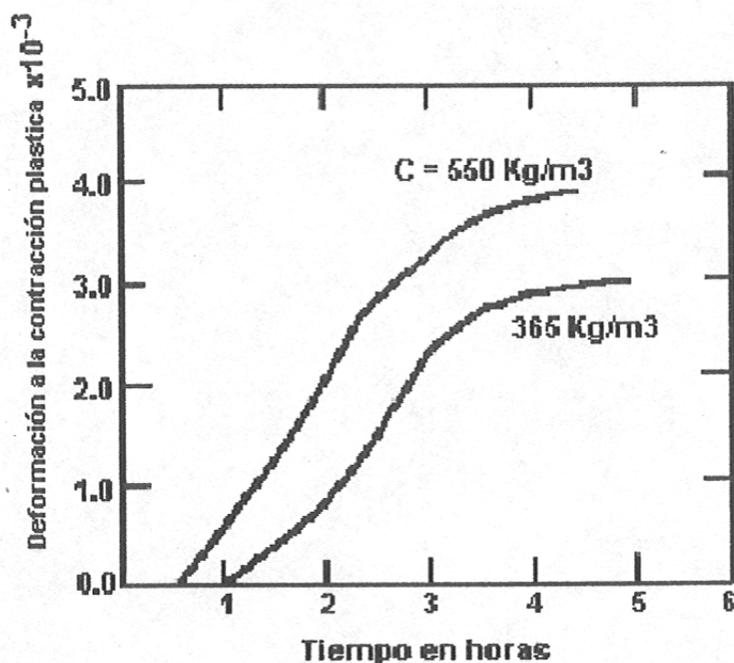


Fig. 8.7. Efecto del volumen de cemento en la contracción plástica de morteros de cemento de consistencia semi-plástica. la temperatura del aire es de 30°C , RH 45%, velocidad del viento 20 km/h.

Debido a la gran combinación de cemento más *fly-ash*, el concreto con *fly-ash* debe exhibir una contracción plástica mayor a la del concreto de referencia. Esto se muestra claramente en la Fig. 8.8 cuando las curvas de la contracción se comparan para el mismo tiempo de mezclado y el contenido de cemento original, en la curva 4 y 5 (60 min el tiempo de mezclado, 280 kg/m³ cemento), 1 y 3 (60 min el tiempo de mezclado, 340 kg/m³ cemento), y 2 y 6 (10 min el tiempo de mezclado, 340 kg/m³ cemento). De hecho, el efecto del *fly-ash* fue bastante significante, aumentando, en el caso de 10 min de mezclado, la contracción plástica por aproximadamente un factor de tres (compare la curva 2 y 6). Debe comprenderse que este efecto del *fly-ash* en la contracción plástica también es en parte atribuible a su efecto tardado en el fraguado del concreto fresco. De aquí la longitud de tiempo en la cual, la contracción plástica tiene lugar y es más larga en el concreto con *fly-ash* que en la parte contraria y ordinaria. Por consiguiente, una contracción mayor se espera en el anterior que en el último concreto.

También es evidente en la Fig. 8.8 que una contracción plástica aumenta significativamente con un incremento en el tiempo de mezclado de 10 a 60 min (compare la curva 1 y 2, y 3 y 6). Este aumento en la contracción es atribuible al efecto de molienda en la operación del mezclado que al prolongar el mezclado, incrementa el contenido de finos en la mezcla de concreto. Finalmente, los datos de la Fig. 8.8 también apoyan la conclusión anterior que un volumen de cemento mayor involucra una contracción mayor (compare las curvas 3 y 5).

La microsilica tiene un promedio del tamaño del grano de 0-1 micras, comparado con un promedio de tamaño de 10 micras para el cemento portland. Se espera que incorporando microsilica en la mezcla del concreto aumentara la contracción plástica significativamente. Datos que directamente relacionan este efecto no están disponibles, pero se observa que con la adición de microsilica teniendo un área de superficie específica de 23900 m²/Kg. incrementa significativamente el agrietamiento plástico.

8.6. Contenido de Agua.

De acuerdo con la ecuación (8.1), se espera que la presión capilar disminuya con un incremento en la cantidad de agua en la mezcla del concreto y una contracción más baja se esperara en una mezcla húmeda que en una seca. Sin embargo, en la práctica, el comportamiento opuesto se observa y la contracción plástica es mayor en mezclas húmedas que en mezclas secas (Fig. 8.9). Es más, el comportamiento es indirectamente soportado por la observación de que los agrietamientos plásticos no ocurren bajo condiciones severas de evaporación en morteros semi-plásticos, mientras que en morteros plásticos y húmedos, de las mismas proporciones de mezclas secas, se agrietaron severamente.

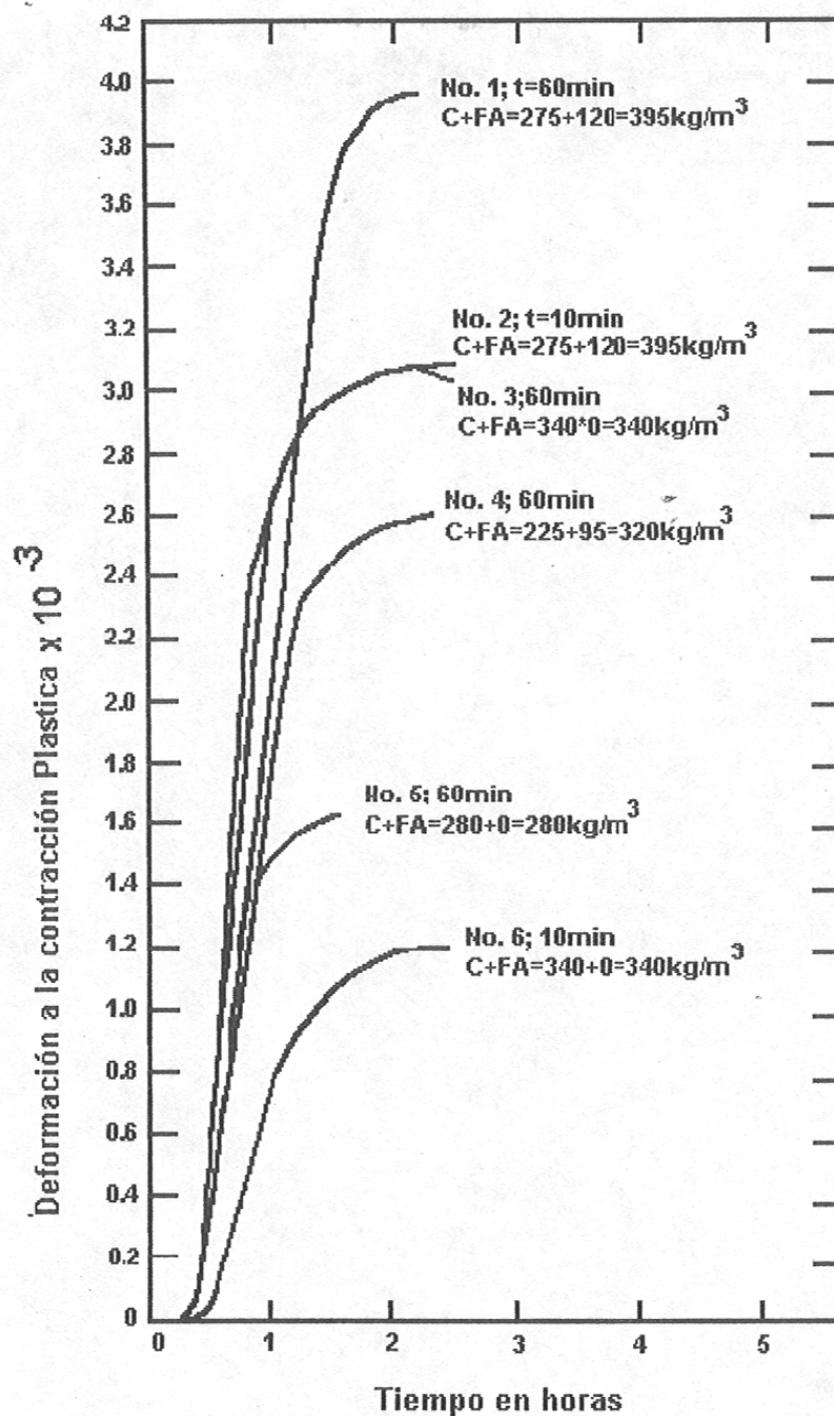


Fig. 8.8. Efecto de adición de fly-ash, tiempo de mezclado y contenido de cemento en una contracción plástica de un concreto.

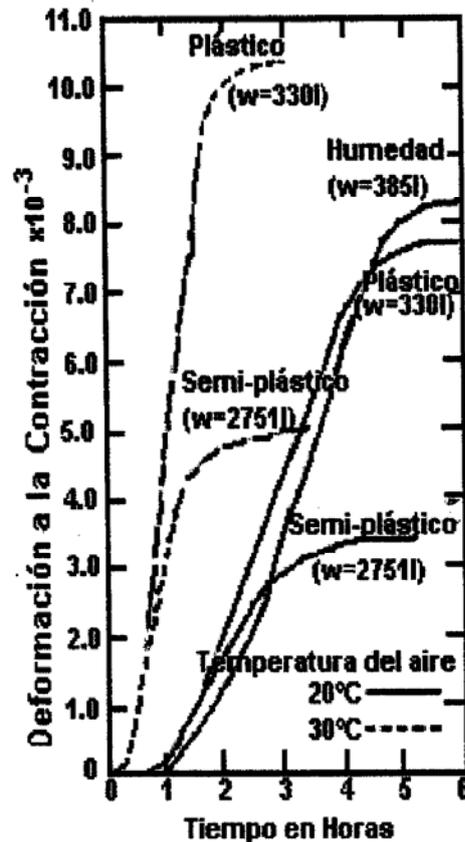


Fig. 8.9. Efecto de volumen de agua (w) en la contracción plástica de morteros de cemento con el volumen de CPO de 550 kg/m^3 expuestos a diferentes condiciones.

Un bajo contenido de agua resulta en una mezcla dura que a su vez, resiste la contracción a una magnitud mayor que una mezcla húmeda con un contenido de agua más alto. Al parecer, este efecto del contenido de agua, es mayor que el efecto teórico esperado y por consiguiente, la contracción plástica en morteros húmedos es mayor que en secos.

8.7. Aditivos Químicos.

Los aditivos químicos afectan la contracción plástica a través de su efecto en el contenido de agua y el tiempo de fraguado. Se espera que los aditivos reductores de agua reduzcan la contracción debido a su reducida demanda de agua, envuelta en su uso, considerando que se espera que el uso de aditivos retardantes de fraguado aumenten la contracción debido a su efecto retardante en el fraguado del concreto.

8.8. *Fibras de Refuerzo.*

Las Fibras son en veces incorporadas en el concreto para aumentar su rudeza, y por eso mejoran su actuación bajo el impacto y la carga dinámica. En algunos casos pero no siempre, la fuerza a tensión del concreto también se mejora. Los tipos diferentes de fibras están disponibles pero, en la actualidad el acero, el polipropileno y también fibras de vidrio son las más usadas, las primeras dos, principalmente en el sitio de la obra, y la última en la producción de fibra de vidrio reforzada para concreto.

8.9. *Agrietamiento Plástico.*

Se explico que el agrietamiento plástico ocurre cuando la fuerza tensora en el concreto que no esta todavía endurecido, provocada por la restringida contracción, excede su fuerza a tensión. El agrietamiento depende, a veces, de factores contradictorios, y no pueden ser relacionados con la intensidad del secado (pérdida de agua) ni con la cantidad de contracción. No obstante, puede declararse que la probabilidad de agrietamiento plástico incrementa con la intensidad del secado por una parte, y disminuye con el aumento desarrollado en la proporción del endurecimiento y la resistencia del concreto fresco por otra esto conduce a que todos los factores que afectan el secado, la contracción plástica y el fraguado pueden afectar similarmente la probabilidad de agrietamiento.

En la práctica, es muy difícil si no imposible, considerar todos los factores involucrados para determinar la posibilidad de agrietamiento plástico que ocurran bajo una situación dada. Se ha sugerido, que cuando la proporción de evaporación del concreto fresco se acerca a 1 kg/m^2 por hora, se tomen precauciones contra la contracción plástica y para estimar esta proporción bajo las condiciones climáticas esperadas, se proporciona la gráfica de la Fig. 8.10. Se recomienda, sin embargo, que en climas calientes, y particularmente en climas secos y calientes, los agrietamientos plásticos siempre deben ser considerados como una posibilidad clara y medios convenientes deben ser empleados para prevenir tales agrietamientos.

Notar que la contracción plástica es condicional en el secado, el agrietamiento puede ser prevenido protegiendo el concreto lo más pronto posible, y siempre antes de que su superficie se seque. Tal protección puede ser lograda cubriendo el concreto con polietileno o rociando su superficie con un sello apropiado. La experiencia ha mostrado que estos medios, cuando se aplican adecuadamente tiene éxito previniendo el agrietamiento plástico. Como se mencionó antes, la incorporación de fibras en la mezcla de concreto también puede ser útil.

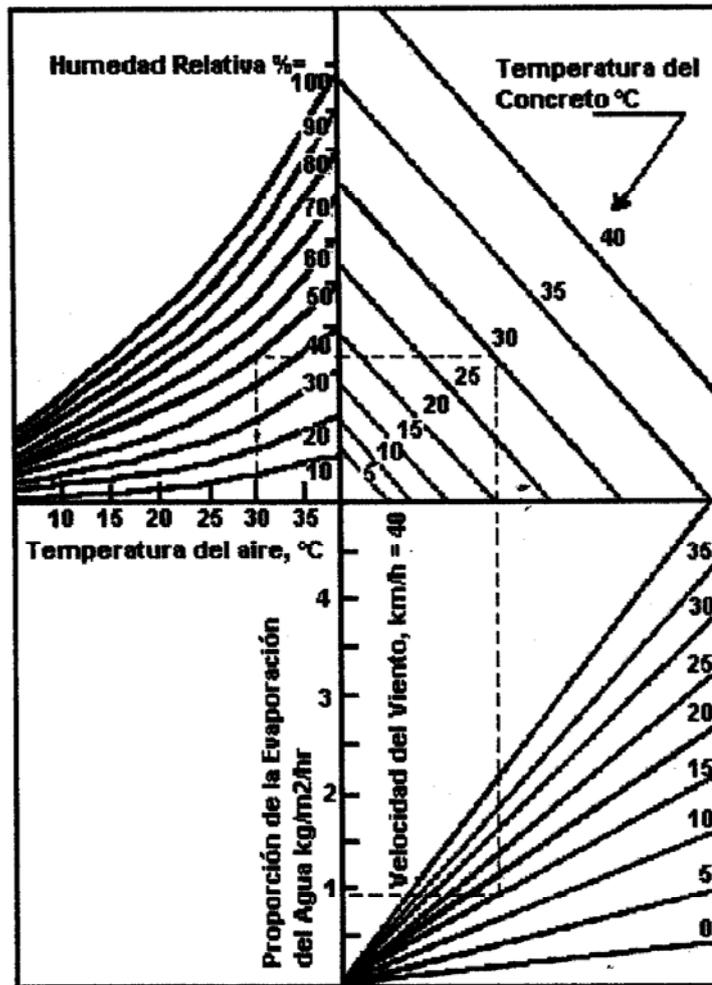


Fig. 8.10. Efecto de factores climáticos en la proporción de evaporación del concreto fresco.

A) Obstrucción del asentamiento debido a la presencia de varillas de refuerzo



B) Asentamiento diferencial debido a la geometría de la sección transversal



Fig. 8.11. Descripción Esquemática de Agrietamiento plástico por asentamiento.

8.10 *Asentamiento y Agrietamiento Plástico*

Cuando el concreto es colocado, existe la tendencia de que el agua en la mezcla tienda a subir a la superficie, entonces los sólidos se asientan y ocurre el sangrado. El sangrado excesivo es característico de mezclas húmedas deficientes en finos. Por otro lado, incrementando la finura del cemento y reemplazando parte de la arena por un relleno fino, ambos reduce el sangrado. Los aditivos aceleradores reducen el tiempo durante el cual el concreto se vuelve plástico y puede asentarse, y por eso reduce el sangrado. Los inclusores de aire son también muy eficaces en la reducción del sangrado y su asociado asentamiento. Las grietas plásticas por asentamiento ocurren en el concreto cuando se exhibe un sangrado relativamente alto y su asentamiento es obstruido por la presencia de varillas de refuerzo en la geometría de la sección transversal en el elemento involucrado (Fig. 8.11). Tales obstrucciones causan un asentamiento diferencial que a su vez, puede causar grietas, esto ocurre cuando el concreto es quebradizo y débil y no puede acomodar dicho asentamiento. A diferencia de las grietas por contracción plástica, las grietas por asentamiento son orientadas y siguen a las varillas de refuerzo y otras obstrucciones. Las grietas plásticas por asentamiento si ocurren y pueden ser eliminadas revibrando el concreto, por supuesto que el concreto permanece bastante plástico para permitir semejante vibrado. Usando una llana para cerrar las grietas puede ser adecuado cuando las secciones son delgadas. Sin embargo, en secciones gruesas, las grietas pueden reabrirse cuando esta la etapa del secado del concreto endurecido, por que al usar la llana es esencialmente un tratamiento de la superficie donde no se afectan las partes profundas de las grietas.

8.11 *Contracción por Secado.*

Se explicó anteriormente que el cemento endurecido es caracterizado por una estructura porosa, con una porosidad mínima de un 28% que se alcanza cuando todos los poros capilares se llenan completamente con el gel de cemento. Esto puede ocurrir, teóricamente por lo menos en una pasta bien curada, hecha con una relación agua-cemento (A/C) de aproximadamente 0.40 o menos. Por otra parte, la porosidad de la pasta es mucho más alta debido a una hidratación incompleta y el uso de la relación A/C más alta. En la práctica, y bajo condiciones normales, una porosidad del orden de un 50%, o más, es esperada. El contenido de humedad de un sólido poroso, incluyendo el del cemento endurecido, depende de factores medioambientales, como humedad relativa, etc., y varía debido al intercambio de humedad con el ambiente. Las variaciones del contenido de humedad generalmente se conocen como movimientos de humedad, e involucran cambios de volumen. Más específicamente, una disminución en el contenido de humedad (el secado) involucra una disminución de volumen normalmente conocida como "contracción por secado" o simplemente contracción. Un incremento en el contenido de humedad (absorción) involucra un aumento de volumen conocido como 'inchamiento'. En la práctica, el aspecto de la contracción es bastante importante porque puede causar agrietamiento, y por eso afecta el desempeño del concreto y su durabilidad.

La discusión siguiente se limita principalmente al aspecto del problema de la contracción. La contracción constituye una propiedad de volumen, esta normalmente es medida por los cambios de longitud asociados y es expresada cuantitativamente por las lineales correspondientes.

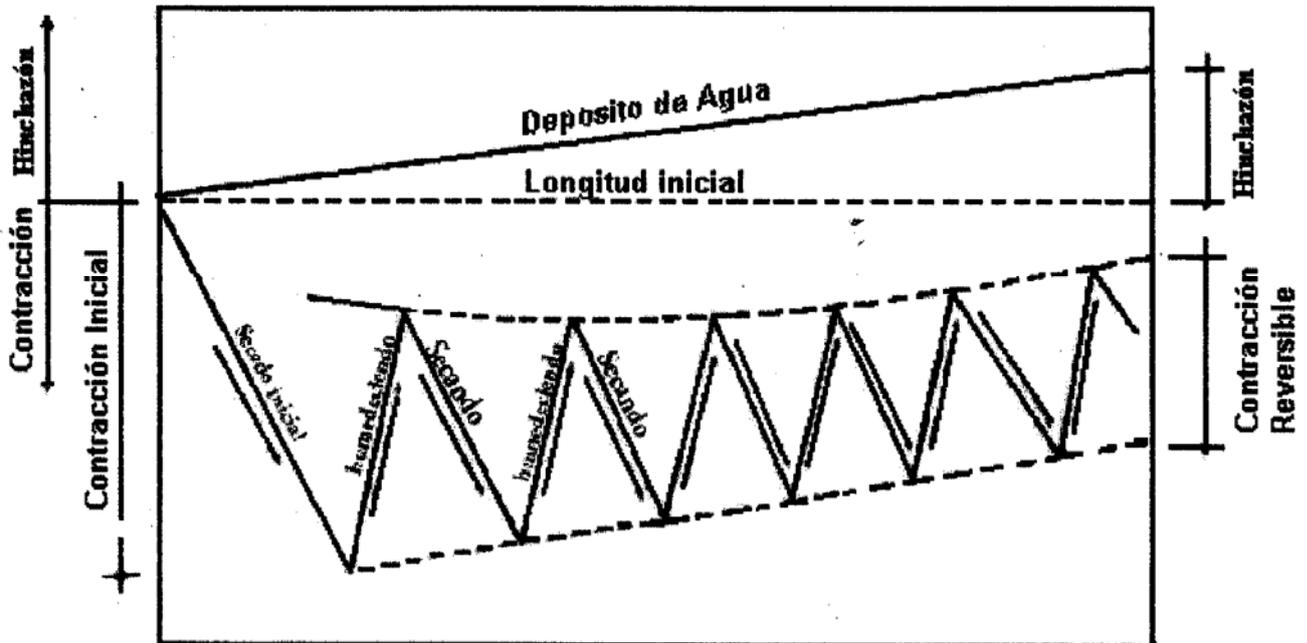


Fig. 8.12. Descripción esquemática de los cambios de volumen en el concreto expuesto a ciclos alternos de humedecimiento y secado.

8.12 Los Fenómenos.

Una descripción esquemática de los cambios de volumen en el concreto, sujetos a ciclos alternos de humedad y secado, se muestran en la Fig. 8.12. puede notarse que la contracción máxima ocurre primero en el secado y una parte considerable de la contracción es irreversible, alguna parte de la disminución del volumen no se recupera con la humedad subsecuente. Mas ciclos de humedad y de secado resultan de pequeñas contracciones irreversibles. Finalmente el proceso se vuelve completamente reversible. De aquí la distinción entre la contracción reversible e irreversible. Sin embargo, en práctica, dicha distinción es apenas importante y el término contracción normalmente se refiere al máximo que ocurre en el primer secado.

8.13 *Contracción e Inflación de los Mecanismos*

Como se mencionó antes, la contracción es provocada por el secado y por la disminución asociada del contenido de humedad en el cemento endurecido. Algunos mecanismos se han sugerido para explicar este fenómeno, y éstos se discuten brevemente a continuación. Puede notarse que en la discusión siguiente se considera a la pasta de cemento principalmente. Sin embargo, es totalmente aplicable al concreto porque la presencia de los agregados en la pasta difícilmente afecta el mecanismo de contracción. Por otro lado, la concentración de los agregados y sus propiedades afectan cualitativamente la contracción.

8.14 *Tensión Capilar*

En el secado se forman meniscos en los capilares del cemento endurecido y la formación de los meniscos provoca fuerzas a tensión en el agua capilar. Las fuerzas a tensión en el agua capilar deben ser equilibradas a través de fuerzas de compresión en el sólido circundante. De aquí la formación de un menisco en el secado sujeta a la fuerza de compresión causando una disminución de volumen elástica. Se considera que la contracción es una deformación elástica si este es el caso. Se esperará que la contracción disminuya bajo las mismas condiciones, con un aumento en la rigidez del sólido, de aquí un incremento en el módulo de elasticidad. En una pasta de cemento el incremento en el módulo de elasticidad aumenta la fuerza que es determinada por la relación A/C. Se espera que la contracción disminuya con una disminución en la relación A/C o alternativamente, con un aumento en la fuerza. El mecanismo de tensión capilar no está completo porque, contrariamente a los datos experimentales y experiencias, predicen la recuperación de la contracción con el tiempo en el proceso de secado.

En la práctica, éste no es el caso y la contracción ocurre continuamente hasta que el secado de la pasta tiene lugar. Normalmente se supone que el mecanismo de tensión capilar es principalmente significativo en la fase temprana del secado, cuando la humedad relativa de los aireadores excede el 50%. Se asume que a humedades más bajas otros mecanismos se vuelven operativos, a semejanza magnitud su efecto es más que suficiente para compensar la recuperación esperada debido a la disminución en la tensión capilar, de aquí continúa la contracción en el secado.

8.15 *Tensión Superficial.*

La Molécula A (Fig. 8.13), dentro de un material, es igualmente atraída y rechazada en todas direcciones por las moléculas reiniciales. Para la molécula B, en la superficie deseada no es el caso, debido a la falta de simetría, la fuerza resultante actúa hacia abajo en los ángulos rectos de la superficie.

Como resultado, la superficie tiende a contraerse y se comporta como una piel elástica. La tensión resultante en la superficie es conocida como tensión superficial. La fuerza resultante, actúa hacia abajo en los ángulos rectos de la superficie, induce fuerzas de compresión dentro del material, y provoca deformaciones elásticas. Puede observarse que para las partículas esféricas la fuerza inducida incrementa con un aumento en la tensión superficial y una disminución en el radio de la esfera. En las partículas de tamaño coloidales, como las partículas del gel de cemento y las fuerzas inducidas pueden ser altas y producir por consiguiente cambios de volumen detectables. Los cambios de tensión de la superficie y esfuerzos asociados son provocados por cambios en la cantidad de absorción de agua en la superficie del material y en la superficie de las partículas del gel. Puede verse en la (Fig. 8.13) que una molécula de agua absorbida, actúa en una molécula B en la dirección opuesta a la fuerza resultante.

La fuerza, por consiguiente disminuye causando un descenso en la tensión superficial. Como resultado, el esfuerzo de compresión en el material se reduce e incrementa el volumen debido a una recuperación elástica, la hinchazón toma lugar. El secado incrementa la tensión superficial y el esfuerzo de compresión causa una disminución de volumen es decir la contracción ocurre. En otras palabras, el mecanismo propuesto atribuye cambios en el volumen de las variaciones en la tensión superficial de las partículas del gel que son provocadas por las variaciones en la cantidad de agua absorbida. Debe notarse que solamente la absorción física del agua afecta la tensión superficial. De aquí el mecanismo sugerido sólo es válido en humedades bajas donde las variaciones en el contenido de agua de la pasta son principalmente debidas a las variaciones en la cantidad de tal agua.

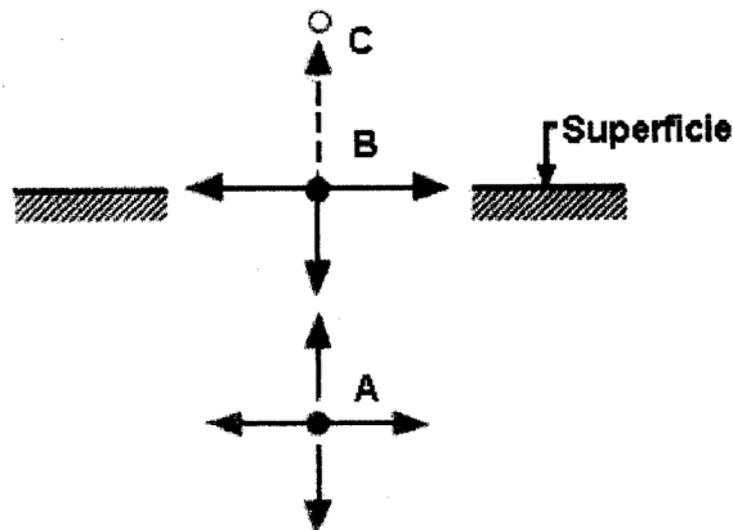


Fig. 8.13. Representación esquemática de una superficie a la tensión.

A humedades más altas, algo de agua en la pasta es decir (agua del capilar) está fuera del rango de fuerzas de la superficie y un cambio en la cantidad de la así llamada agua libre no afecta la tensión superficial. Se ha sugerido que el mecanismo de tensión superficial es sólo operativo cuando la humedad relativa esta por arriba del 40%.

8.16 Incrementando la Presión.

A una temperatura dada, el espesor de una capa de agua absorbente en la superficie de un sólido está determinada por la humedad relativa del ambiente. En superficies que están lo bastante cerca una de otra, la capa absorbente no puede desarrollarse totalmente de acuerdo con la humedad relativa existente. A estas superficies se les conoce como "áreas de absorción obstruida". En estas áreas la hinchazón o desunión de presión es desarrollada y esta presión tiende a separar las partículas adyacentes, y esto causa una hinchazón. Este mecanismo es descrito esquemáticamente en la Fig. 8.14. Como se mencionó antes, el espesor de la capa de agua de absorción aumenta con la humedad relativa y, de acuerdo con este mecanismo la presión hinchada aumenta correspondientemente. La hinchazón de la pasta de cemento incrementa con el aumento en su contenido de humedad. Una disminución de la humedad relativa causa el secado. Por consiguiente, el espesor de la capa absorbente, y la presión de hinchazón asociada se disminuye. Cuando la presión de hinchazón disminuye, la distancia entre las partículas del gel mutuamente atraídas es reducida y la contracción se lleva a cabo. En otras palabras, según este mecanismo, los cambios de volumen son provocados por cambios en la separación de las partículas internas que, a su vez, son causados por variaciones en la presión.

8.17 Movimiento del Agua en la capa Interna.

Los silicatos de calcio hidratados del gel de cemento, son caracterizados por una estructura de capas. La salida y entrada del agua fuera y dentro de dicha estructura, afecta el espacio entre las capas y por eso causa cambios de volumen. La salida de agua en el secado reduce los espacios y provoca una disminución de volumen, es decir la contracción. Por otra parte la reentrada de agua en el remojado incrementa el espacio, y eso causa un aumento de volumen, es decir la hinchazón.

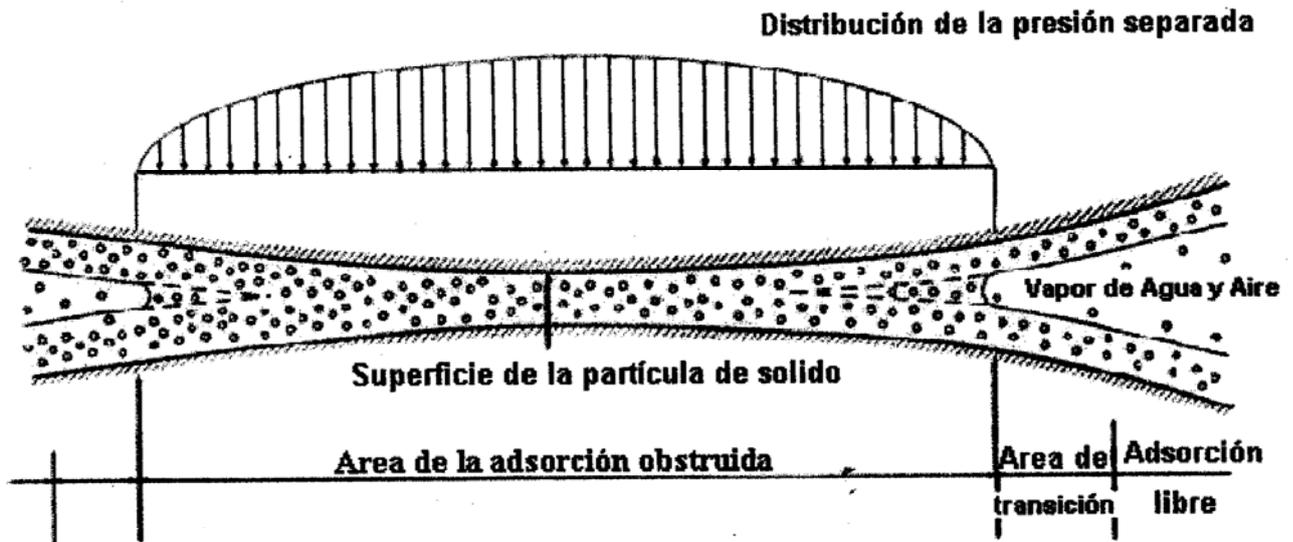


Fig. 8.14. Descripción esquemática de áreas de adsorción impedida y el desarrollo de presión inflada.

8.18 Factores que Afectan la Contracción.

Como se explico anteriormente, la contracción es provocada cuando la pasta de cemento se seca. Por consiguiente, todos los factores medioambientales que afectan el secado, afectan también la contracción. La contracción también es afectada por la composición de algunas propiedades del concreto. Todos estos factores que determinan la contracción se discuten después con algunos detalles.

8.19 Factores Medioambientales

Los factores medioambientales que afectan el secado incluyen la humedad relativa, la temperatura y la velocidad del viento. Parte de los efectos medioambientales se muestran en la Fig.8.15 y considerando los datos de esta figura, así como los datos de la Fig. 8.4, está claro que la intensidad del secado (la proporción de evaporación) aumenta con la disminución de la humedad relativa, el incremento en la temperatura y la velocidad del viento.

En otras palabras, en climas calientes, y particularmente en un ambiente caliente y seco, la relación y la cantidad de contracción se espera que sea mayor y mejore bajo condiciones climáticas moderadas. La contracción puede causar agrietamiento y la posibilidad de dicho agrietamiento se incrementa, la contracción mayor ocurre en la etapa temprana. De aquí la contracción induce al agrietamiento y debe considerarse como una posibilidad distinta en climas cálidos y secos, se deben emplear medios apropiados para reducir el riesgo de dicho agrietamiento.

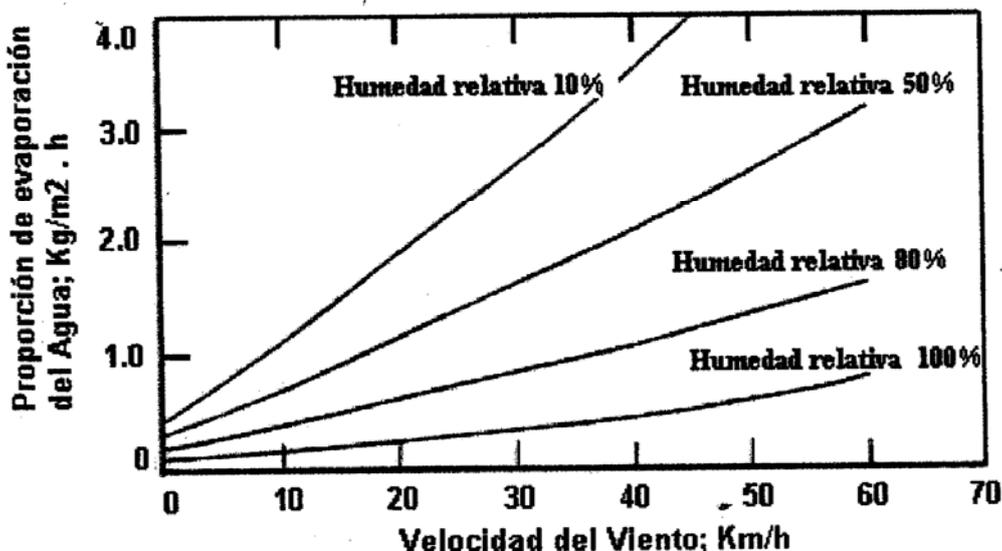


Fig. 8.15. Efecto de la velocidad del viento y de la humedad relativa en la proporción de la evaporación del agua en el concreto. Temperatura ambiente del concreto de 30°C.

Considerando los mecanismos que son sugeridos para explicar la contracción, es evidente que la contracción incrementa con un aumento en la intensidad del secado, es decir con el incremento en las cantidades de agua perdidas durante el secado del concreto. Se muestra en los datos de la Fig. 8.16, que esta relación no es necesariamente lineal pero generalmente se caracteriza por dos distintas etapas; en la primera donde el secado toma lugar en la región de alta humedad, una gran cantidad de agua es perdida, sin embargo solo toma lugar una pequeña contracción. En la segunda etapa cuando el secado toma lugar en bajas humedades una pérdida de agua más pequeña se asocia con una considerable mayor contracción. Un ejemplo bajo estas condiciones se muestra en la fig. 8.16, una pérdida de agua aproximadamente del 17% en una región de humedad alta resulta con una contracción de un 0.6%, donde una pérdida adicional del 6% en una región baja, la contracción se duplica a 1.2%. El mecanismo de tensión capilar expuesto anteriormente puede ser usado para explicar porque en las etapas tempranas del secado, la cantidad de agua perdida es mayor comparada con los resultados de la contracción resultante. En las etapas tempranas la evaporación del agua es por los grandes poros, es decir poros capilares, considerando por la cantidad de agua que se pierde.

A pesar de esto el resultado de la contracción es pequeño por el relativo gran diámetro de los poros involucrados. En las etapas tardías el agua se evapora por los poros del gel más pequeño. De aquí la cantidad de agua perdida es comparativamente menor, pero la contracción es relativamente alta. En la siguiente conclusión debido a una mayor intensidad del secado, una alta contracción se espera en climas cálidos, por ejemplo una contracción estimada con respecto a la humedad relativa del ambiente de acuerdo con las normas británicas BS8110, parte 2 1985. Puede verse en la figura 8.19 que la contracción depende de la humedad relativa, por ejemplo la disminución del 85 al 45% es esperado para incrementar la contracción aproximadamente por un factor de 3.

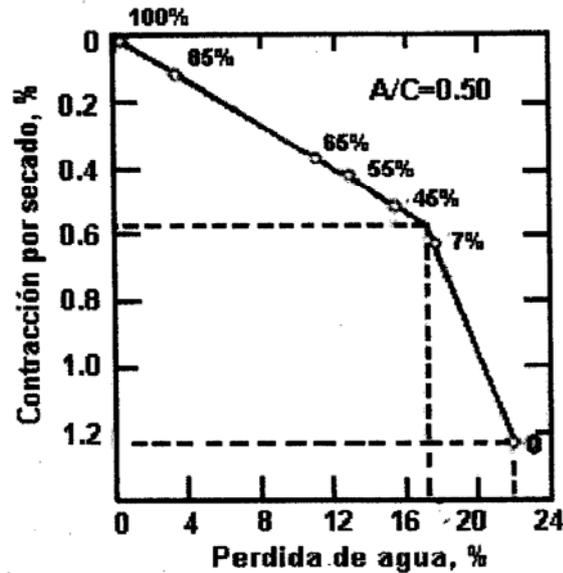


Fig.8.16. Efecto de pérdida de agua en la contracción de la pasta de cemento.

Al exponer el concreto fresco a un corto periodo de tiempo es decir de 1 a 2 horas, con un secado intensivo, la fuerza del concreto incrementa con el tiempo, pero los periodos expuestos causan reducciones en la fuerza, el concreto fresco expuesto a cortos periodos de tiempo se espera que reduzca la contracción y dicha reducción se observa en el concreto expuesto a cortos periodos de tiempo con un secado intensivo (fig. 8.17). Los benéficos efectos en el secado del concreto son limitados a cortos periodos de tiempo de 1 a 2 horas, la reducción de estos efectos en la contracción es evidente para largos periodos de tiempo de 6 a 9 horas. Estas diferencias de tiempo se atribuyen a los efectos del secado en la estructura del concreto que a su vez afecta de diferentes formas, a la fuerza y a la contracción. A diferentes edades donde el concreto todavía es plástico y puede asimilar cambios en el volumen, el secado causa consolidación en la mezcla fresca y reduce la relación agua cemento. El incremento de la fuerza es asociado con la reducción de la contracción, con el tiempo del fraguado el concreto no puede asimilar los cambios de volumen, y es aquí cuando se produce el agrietamiento. Tales agrietamientos reducen la fuerza y se benefician con los efectos al realizarse el secado. El siguiente efecto es una reducción de la fuerza del concreto, por otra parte la presencia de grietas, incluyendo grietas internas reducen la contracción por que algunos de los esfuerzos inducidos toman lugar en las grietas y esto no se refleja, y de aquí el tamaño de las dimensiones del concreto. El efecto de reducción del tardado y corto secado dentro de la contracción del concreto también se observa para otros tipos de clima cálido, seco y húmedo. Se comprende, sin embargo, que el efecto aparentemente beneficioso del secado rápido es muy limitado. Con los datos en cuestión se obtuvieron en el laboratorio pruebas de especímenes, y en tales especímenes, la contracción se contiene ligeramente. En la práctica donde la contracción siempre es contenida por el refuerzo de cemento, se conecta con los miembros adyacentes y con la fricción. Por consiguiente, la exposición del concreto al secado, y particularmente al secado intensivo, es muy probable para que se produzcan agrietamientos, y tal exposición debe por consiguiente ser evitada. De hecho, el concreto fresco debe protegerse del secado lo más pronto posible, y particularmente en un ambiente caliente y seco.

8.20 Composición del Concreto y sus Propiedades

8.20.1. Concentración de los agregados.

Considerando la contracción, puede considerarse al concreto como un material de la fase dos que consiste en la pasta de cemento y los agregados. La contracción de la pasta de cemento, cuando se midieron los cambios de longitud, puede alcanzar de un 0 a un 5%, considerando que los agregados del concreto normal son mucho más pequeños. La contracción del concreto es esencialmente determinada por la contracción de la pasta y su concentración en el concreto. Es decir, se espera que la contracción del concreto incremente con un aumento en el volumen de la pasta o, alternativamente, con una disminución de los agregados. Este efecto de concentración de los agregados es apoyado por los datos experimentales presentados en la Fig. 8.21.

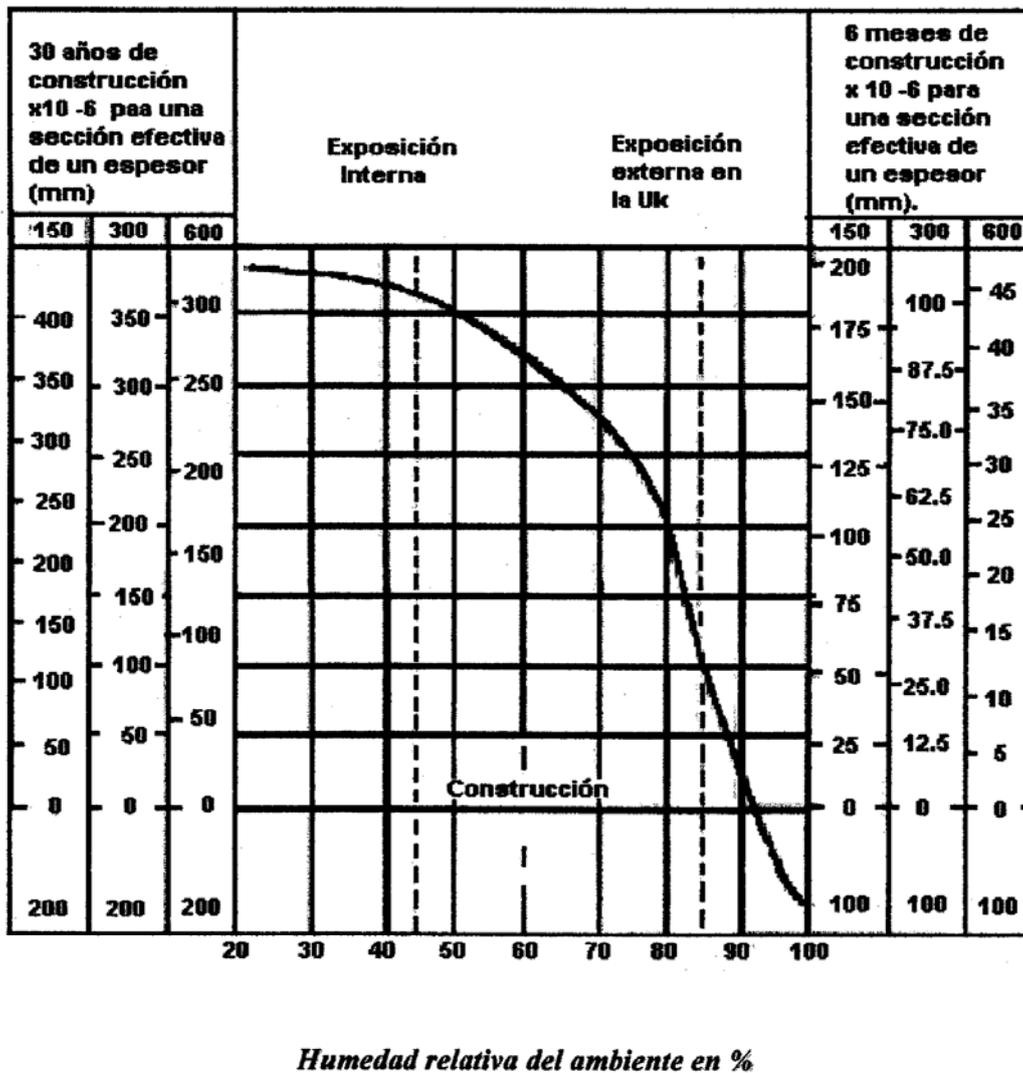


Fig. 8.17. Efecto de la humedad relativa en la contracción.

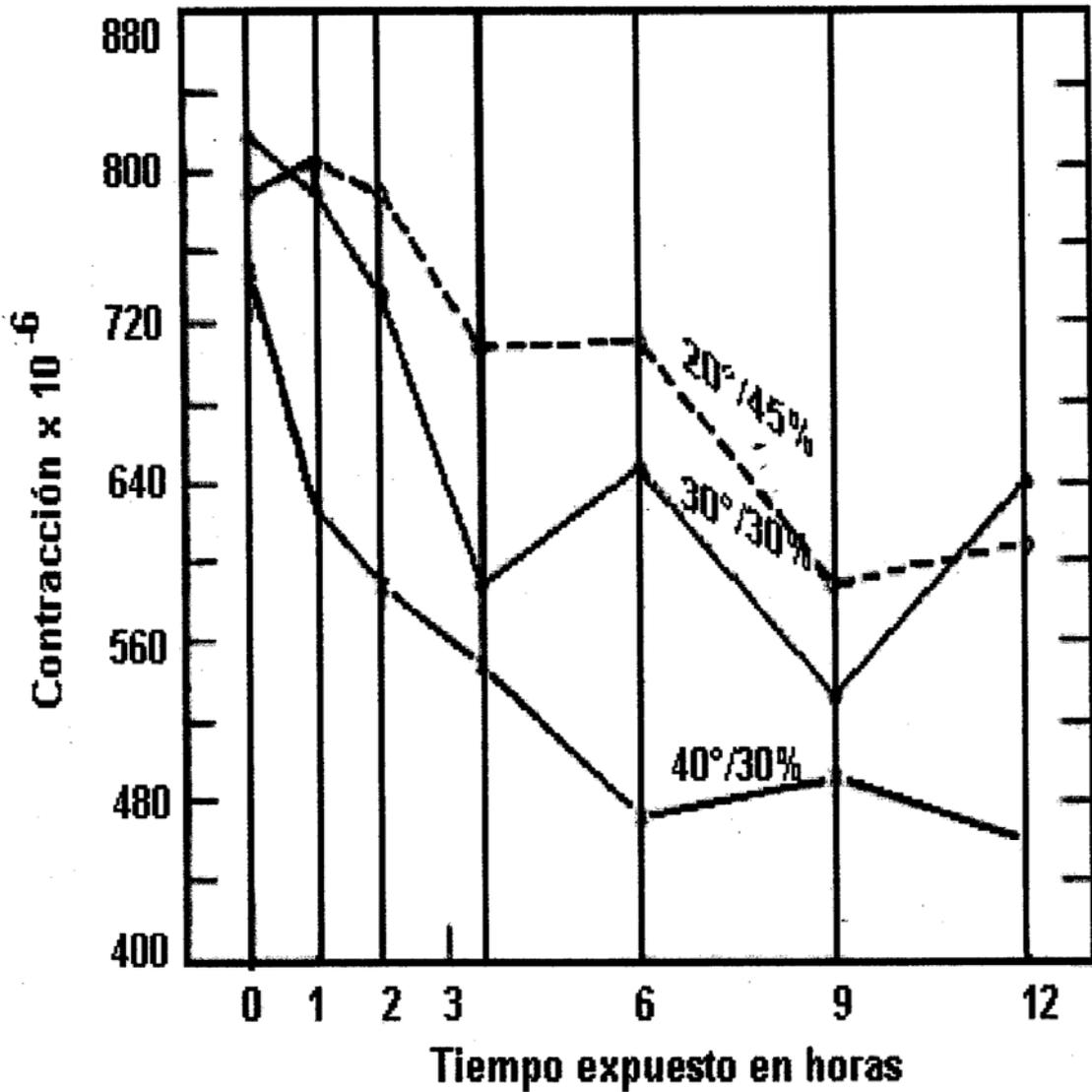


Fig. 8.18. Efecto de exposición temprana a las temperaturas y humedades relativas indicadas (velocidad del viento 20 km/h), contracción del concreto que contiene 350 kg/m³ de cemento portland ordinario. Secado a 20°C y 50% HR, desde la edad de 28 días a la edad de 425 días.

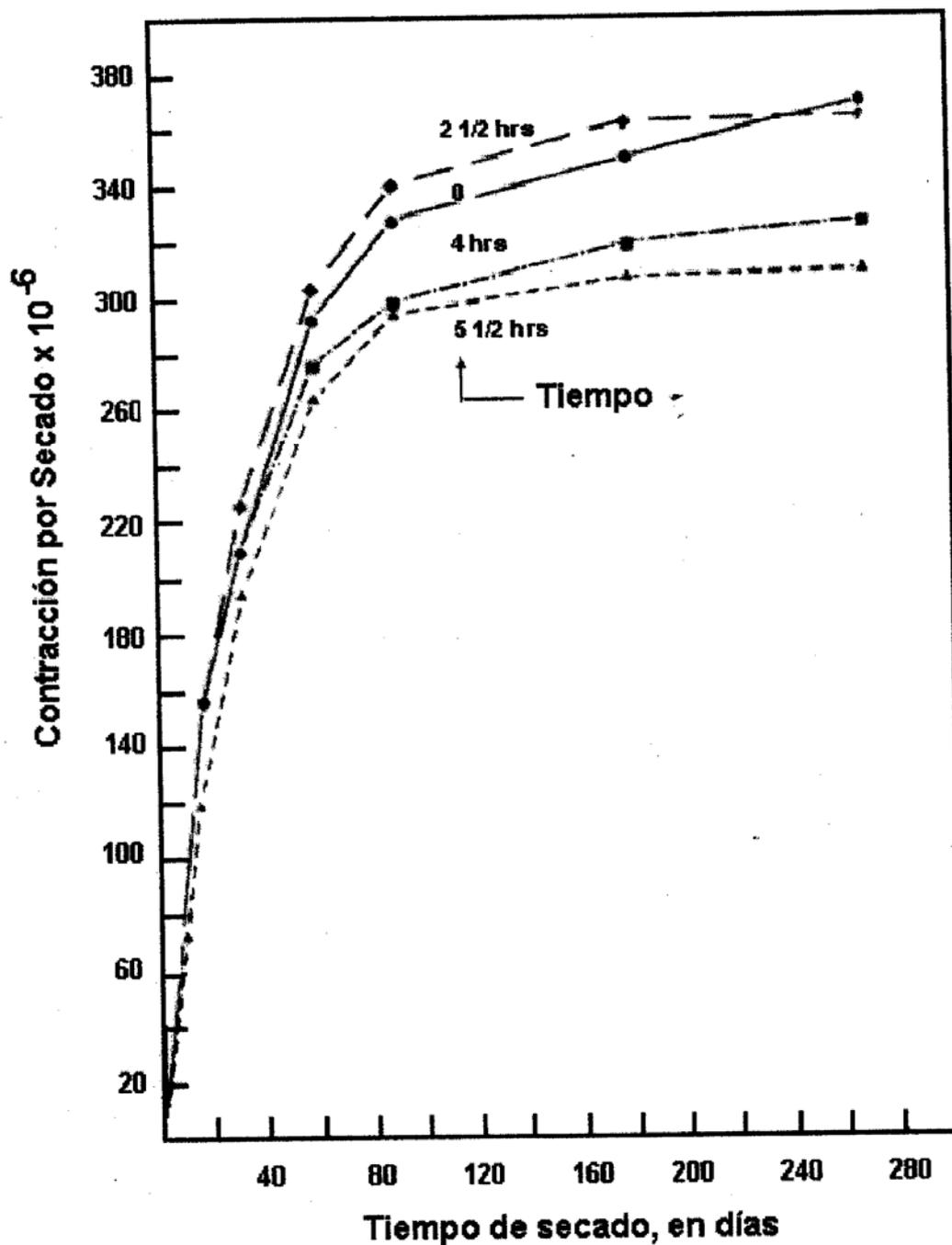


Fig. 8.19. Efecto de exposición temprana en un túnel del viento, para la longitud de tiempo indicada, en la contracción del concreto guardado a la edad de 7 días a las 20°C y 50% HR.

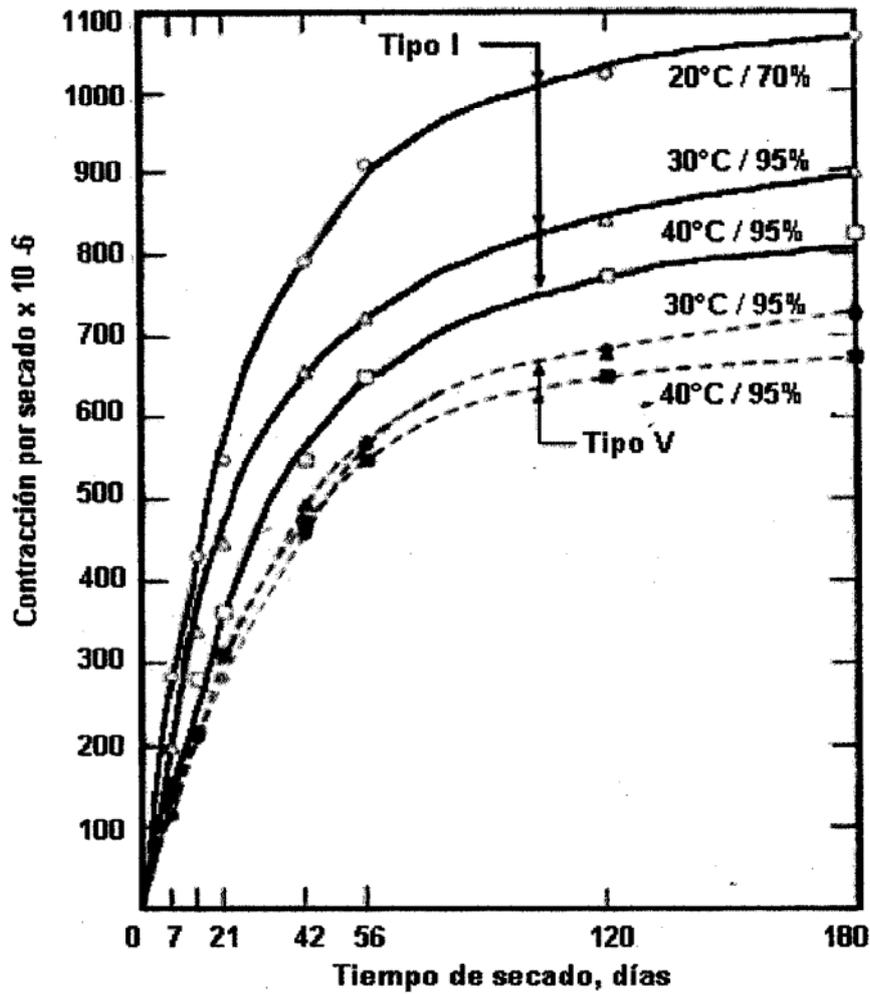


Fig. 8.20. Efecto de 24 hr. de exposición a las temperaturas y humedades relativas indicadas (aire tranquilo), en la contracción del concreto a la edad de 28 días a 20°C y HR de 50%.

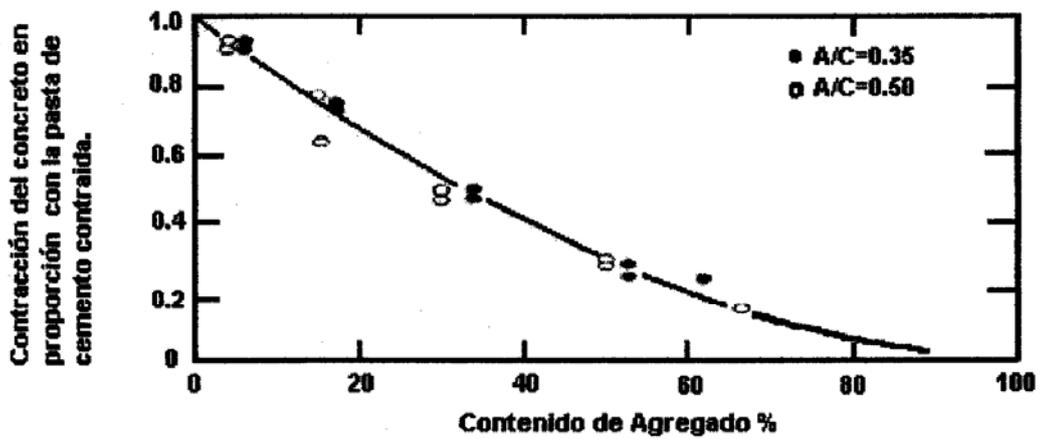


Fig. 8.21. Efecto de concentración de los agregados en la contracción del concreto.

8.21 Rigidez de los Agregados.

Notando que la contracción con agregados normales es mucho más pequeña comparándola con una pasta de cemento, y la presencia de los agregados detendría la contracción a una magnitud que dependa de su rigidez. Discutiendo sobre los mecanismos de contracción, se menciona que la contracción realmente es una deformación elástica. Por consiguiente, se espera que la contracción dependa del módulo de elasticidad del concreto y disminuya con un aumento en el último, y viceversa. La rigidez de los agregados afecta el módulo de elasticidad del concreto y por eso afecta su contracción. Es decir, bajo las mismas condiciones, una contracción más baja será esperada en un concreto hecho con un agregado rígido que a un concreto hecho con un agregado suave, como un agregado ligero. Esta última conclusión, y la dependencia de la contracción en el módulo de elasticidad del concreto, se indica por los datos de la Fig. 8.22.

Las combinaciones efectuadas en la concentración de los agregados y en la rigidez de la contracción del concreto por la fórmula siguiente:

$$S_c = S_p (1 - V_a)^n$$

Donde S_c y S_p son la contracción correspondiente en la fuerza del concreto y de la pasta, respectivamente V_a , es la concentración de los agregados; y n representa las propiedades elásticas de los agregados.

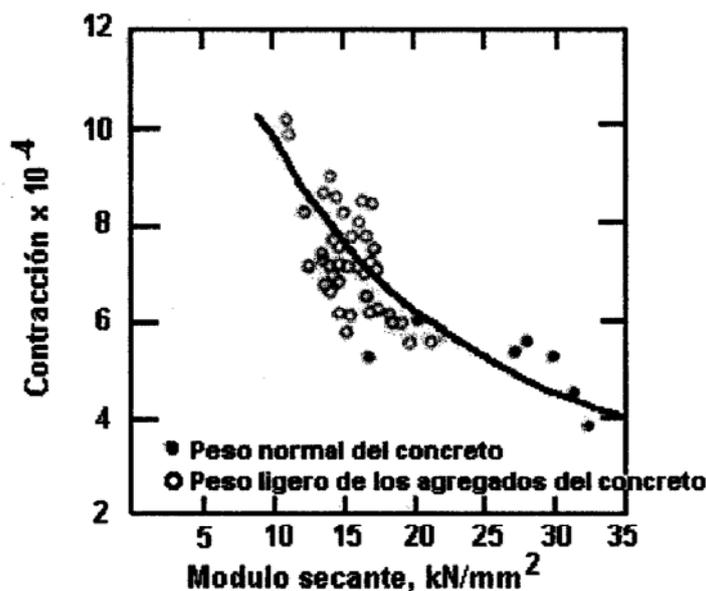


Fig. 8.22. Relación entre la contracción y el módulo de elasticidad del concreto.

8.22 *Contenido de Cemento.*

La concentración de la pasta en el concreto es determinada por el contenido o volumen de cemento. Una concentración mayor, y consecuentemente una contracción mayor se esperará en el concreto rico en cemento, que en un concreto pobre.

8.23 *Contenido de Agua.*

Se relaciona la contracción a la cantidad de agua perdida en el secado (Fig. 8.16). Bajo las mismas condiciones, la mayor pérdida de agua, se espera la más alta contracción. Puede esperarse que el más alto contenido de agua, más agua está disponible en el secado y por consiguiente, una mayor contracción se llevara acabo. Es decir, se espera que la contracción aumente con un incremento en el contenido de agua. Esta conclusión se apoya por los datos de la Fig. 8.23.

8.24 *Relación A/C.*

La contracción que es una deformación elástica, se relaciona con el módulo de elasticidad del concreto. El módulo de elasticidad se relaciona con la fuerza del concreto que a su vez, es determinado por la relación A/C. Se espera que la relación A/C afecte la contracción de una manera similar, y la relación A/C más alta producirá una contracción mayor. Este efecto se indica en la Fig. 8.24. Puede concluirse que para producir un concreto con una contracción mínima, el agua y los volúmenes de cemento, así como la relación A/C, deben mantenerse a un mínimo. Puede notarse sin embargo, que los tres se interrelacionan, y seleccionando el valor de cualquiera de los dos determina el valor de un tercero. En práctica, el contenido de agua se selecciona para dar al concreto fresco la consistencia requerida, y la relación A/C para dar al concreto endurecido la cualidad y durabilidad deseada. El volumen de cemento es determinado de acuerdo con el contenido de agua y la relación A/C preseleccionada. Finalmente, puede notarse que para un volumen de cemento dado, aumentando el contenido de agua es asociado con una relación A/C más alta. El incremento resultante de la contracción no es atribuible al contenido de agua aumentado por la relación A/C más alta, asociada por otro lado que para el mismo volumen de agua que incrementa los resultados del cemento satisfechos con una relación A/C más baja. Es decir, en el caso donde la contracción es determinada a través de dos efectos contrarios, se espera que el volumen de cemento aumentado incremente la contracción, considerando que la relación A/C se reduzca. En practica el concreto rico en cemento normalmente exhibe una contracción más alta que con un concreto pobre en cemento.

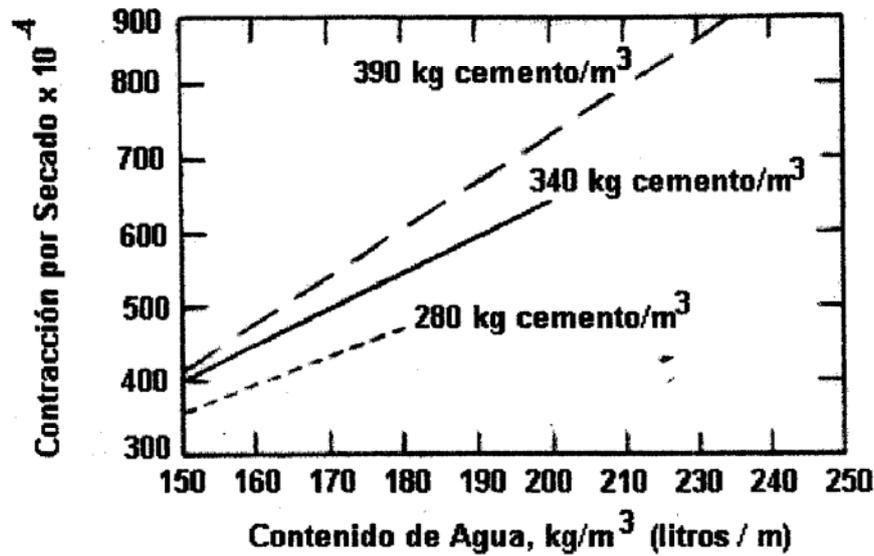


Fig. 8.23. Efecto del contenido de agua en la contracción de un concreto hecho de volúmenes de cemento diferentes.

8.25 Agregados Minerales

El efecto de las mezclas en la contracción por secado de un concreto, debido a la variación en las propiedades de los varios tipos disponibles de cemento, sólo puede discutirse de una manera general. No obstante, la estructura de la pasta hecha de cementos mezclados es caracterizada normalmente por una estructura del poro más fina y a veces por una porosidad más baja. Por otro lado, considerado los mecanismos de la contracción con un poro más fino y una porosidad más alta, se asociaría con una contracción más alta. Se esperará que la contracción del concreto hecha con una mezcla de cemento será más alta que una contracción hecha por un cemento portland ordinario (CPO). Considerando los datos de las Fig. 8.25-8.27, puede notarse que sólo cuando el cemento se reemplazó con escoria granulada de alto horno la contracción por secado del concreto aumentó rápidamente (Fig. 8.27). El aumento correspondiente, sin embargo, es bastante pequeño cuando el cemento fue reemplazado por una puzolana natural (Fig. 8.25) o fly-ash (Fig. 8.26) y desapareció completamente cuando se usó para el cemento humo de sílice condensado (Fig. 8.27). Es más, también existen algunos datos contradictorios que indican que para la contracción por secado de un concreto con fly-ash es realmente más baja que la de un concreto con CPO.

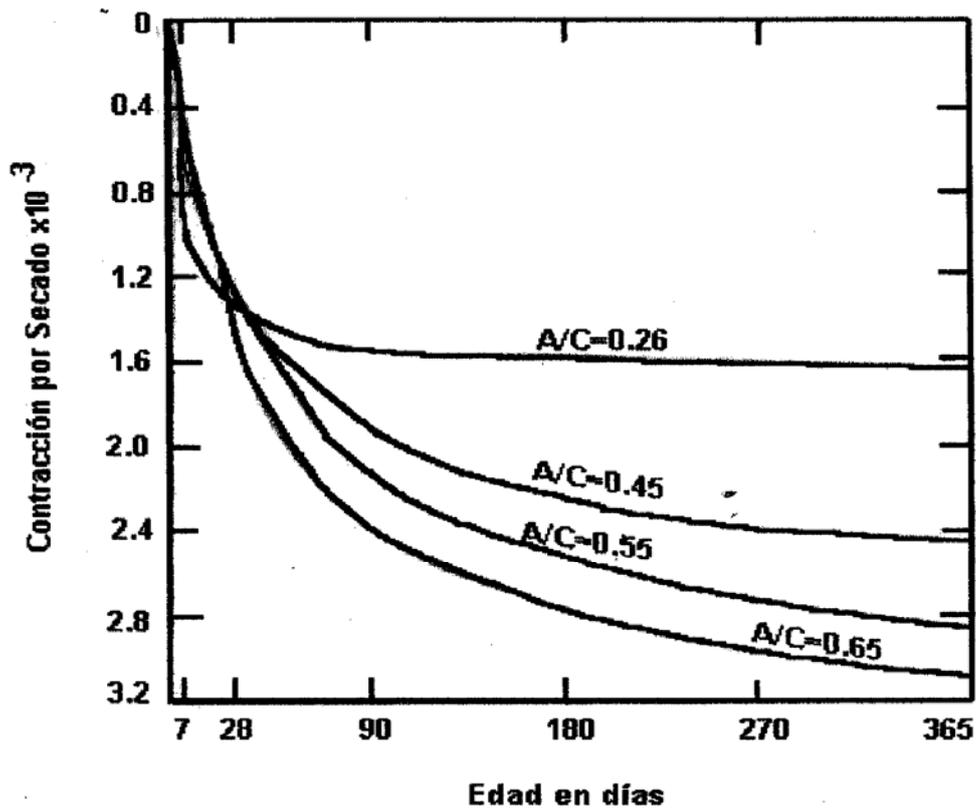


Fig. 8.24, Efecto en la relación A/C en la contracción de la pasta de cemento.

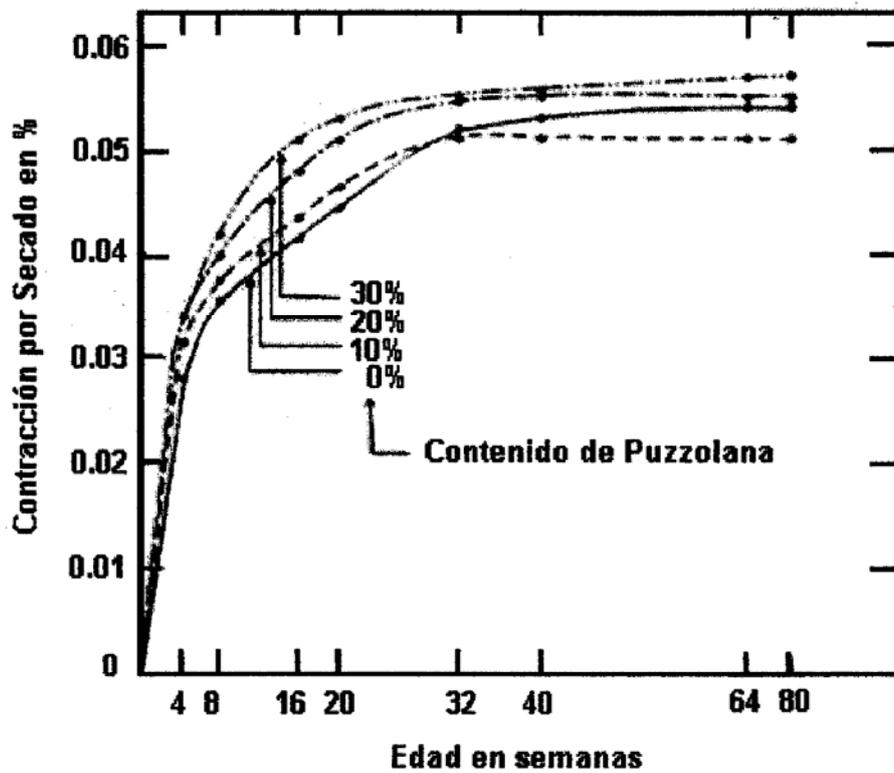


Fig. 8.25. Efecto de reemplazar CPO con una puzolana natural (tierra de Santorin) en la contracción por secado del concreto.

Por ejemplo, en la mayoría de los casos, se compara la contracción en los concretos de la misma consistencia, y en los concretos que pueden variar con respecto a su volumen de agua y su relación A/C. Como el contenido de agua y la relación A/C pueden afectar los datos de prueba de la contracción diferentemente y esto puede explicar a veces la naturaleza contradictoria de los resultados.

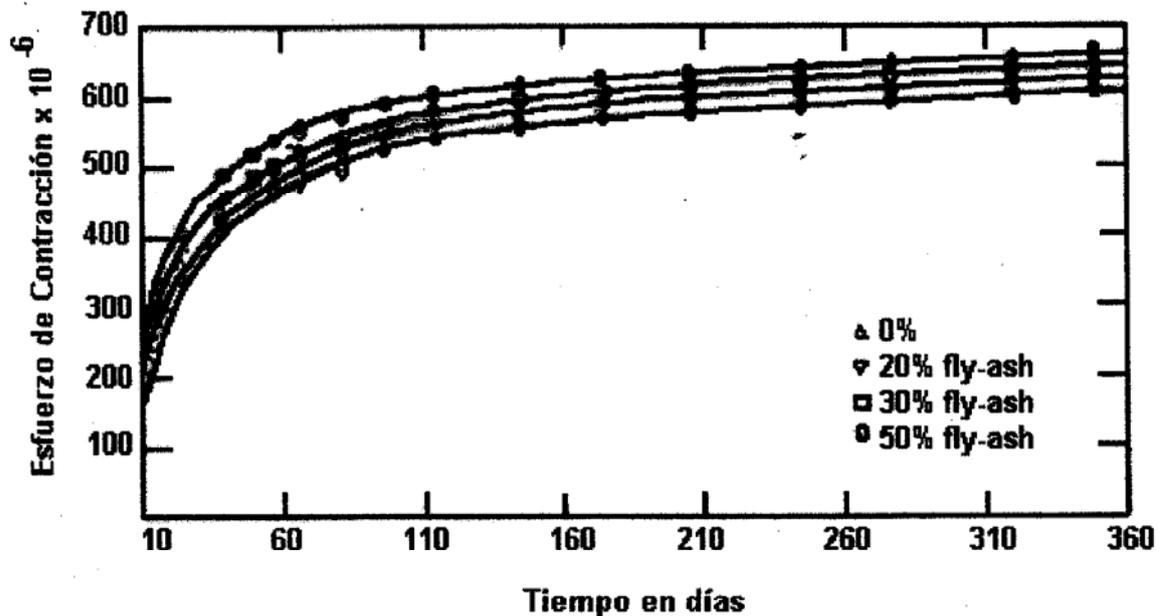


Fig. 8.26. Efecto de reemplazar CPO con fly-ash de alto-calcio en la contracción por secado del concreto.

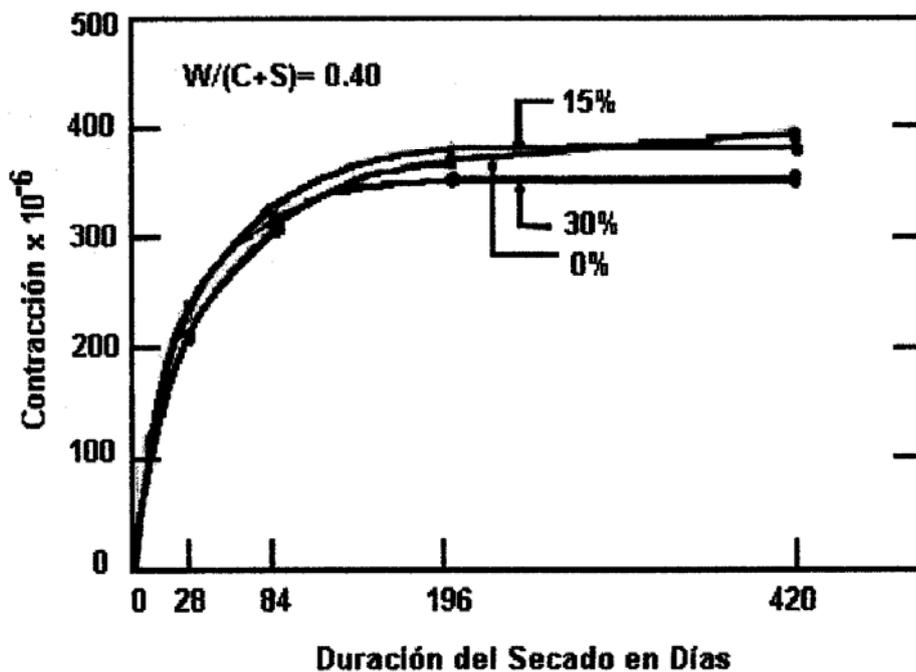


Fig.8.27. Efecto de reemplazar CPO con humo de sílice en la contracción por secado del concreto.

La probabilidad de agrietamiento es mucho mayor en un ambiente caliente, y particularmente en un ambiente caliente y seco, que en uno moderado debido al secado más intensivo y rápido. Bajo tales condiciones, el agrietamiento debe ser considerado como una posibilidad distinta y siempre deben emplearse medios adecuados para reducir esta posibilidad y quizás incluso para eliminarla totalmente. Estos incluyen significados para producir un concreto con la posible más baja contracción.

(1) La mezcla de concreto debe diseñarse con una cantidad de agua y un contenido de cemento bajo. En este aspecto el uso de agregados más toscos, es decir agregados de un tamaño de partículas máximo, con un contenido bajo en finos. El uso de aditivos reductores de agua debe ser favorablemente considerado.

(2) La contracción debe tardarse prácticamente lo más posible porque el desarrollo de fuerza con el tiempo reduce la probabilidad de agrietamiento. Es decir, debe protegerse al concreto de secar lo más pronto posible. En este aspecto debe notarse que este efecto benéfico del incremento de la fuerza dentro de la posibilidad de agrietamiento es algo reducido por el aumento asociado del módulo de elasticidad del concreto. Las fuerzas inducidas son iguales a ϵS . El aumento en el módulo de elasticidad involucra un nivel de fuerza más alto, y por eso neutraliza el efecto de un incremento de fuerza. En general, el módulo de elasticidad, E , se relaciona con la fuerza de compresión del concreto, S , y por la expresión $E = k\sqrt{S}$, donde k es una constante que depende de las condiciones específicas como la forma y tamaño del espécimen. Por ejemplo, un aumento de cuatro veces la fuerza involucra sólo un aumento de dos veces en el módulo de elasticidad. Es decir, el efecto de un incremento de fuerza en la contracción pesa más que el efecto contrario del aumento correspondiente en el módulo de elasticidad.

(3) Deben mantenerse juntos los miembros del concreto para reducir el efecto de la estructura de la contracción. Es evidente que el contenido más pequeño, las fuerzas a tensión inducidas más bajas, y por eso la posibilidad de agrietamiento reducida.

Generalmente se acepta que la composición exacta del cemento apenas afecta la contracción, excepto cuando el volumen de yeso se desvía significativamente del óptimo. En este aspecto sin embargo, el posible uso de la contracción que compensa al cemento a veces se sugiere. El fraguado del cemento es acompañado por la expansión y el contenido de refuerzo del cemento induce fuerzas de compresión en el concreto endurecido. Estas fuerzas compensan en parte o totalmente la contracción inducida en las fuerzas de tensión, y por eso puede prevenir el agrietamiento. En la actualidad el uso de tales cementos es limitado y la información sobre su comportamiento en ambientes calientes está escasamente disponible.

Conclusiones y Recomendaciones

- 1) El clima caluroso es un factor adverso que incide en el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido.
- 2) Una temperatura alta y un ambiente seco afectan el desarrollo de los productos de la hidratación temprana del concreto.
- 3) Por lo anterior se refleja en desarrollo del fraguado y por lo tanto en la pérdida de revenimiento.
- 4) No acatar las recomendaciones del clima caluroso requerirá a no conseguir la trabajabilidad adecuada y por lo tanto admitir la presencia de problemas durante la colocación.
- 5) Un mal manejo en clima caluroso es un una invitación a permitir la presencia de problemas durante la colocación.
- 6) El uso de agregados minerales, mejora el comportamiento del concreto fresco y además, modera el calor interno de la mezcla.
- 7) El uso de hielo y de agua fría es un uso primordial, si se realizan actividades bajo condiciones extremas de temperatura.
- 8) La combinación de temperatura del concreto. Humedad relativa, velocidad del viento, temperatura del aire, no sobrepase el de evaporación de $1 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$.

- 1) El Ingeniero responsable tendrá que revisar las condiciones previas al curado en caso de tratarse de clima caluroso, conjuntamente con la supervisión y el laboratorio, (Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del Viento y Hora del Colado).
- 2) Checar: Cimbra, Accesos, Personal humano, Equipo.
- 3) Aspectos durante el colado: Tiempo de llegada de la unidad, revenimiento, temperatura del concreto, la eficiencia de la colocación (vibrado), acabado (no usar el agua de sangrado).
- 4) Aspectos posteriores al colado:
 - Curado: vía de membrana o vía hidratado.
 - Cuidados: Aquellas actividades que entorpezcan el desarrollo de un buen curado.
- 5) No usar curado acelerado en verano (curado a vapor).
- 6) Se recomienda el uso de aditivos para retardar o alargar los tiempos de colocación.
- 7) Se recomienda el retemplado siempre y cuando este dentro del tiempo especificado y en presencia del laboratorio.

Glosario

Absorción:

Es el incremento en porcentaje, respecto a la masa seca inicial, de un material sólido Como resultado de la penetración de agua en sus poros permeables.

Aditivo:

Es un material diferente al agua de los agregados y del cemento hidráulico, que se puede emplear como componente del concreto o mortero, que se agrega a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado, y que modifica algunas características del concreto.

Agregados:

Son los materiales naturales, manufacturados o artificiales, que se mezclan con los cementantes para hacer morteros o concretos.

Aire Atrapado:

Vacios en el concreto que se crean de forma natural durante el proceso de mezclado.

Aire Incluido:

Burbujas de aire incorporadas intencionalmente en el mortero o concreto durante el mezclado.

Ataque de Sulfatos:

Reacción física, química o ambas entre sulfatos y concreto o mortero.

Calor de Hidratación:

Calor liberado por la reacción química del cemento con el agua.

Carbonatación:

Es un proceso por el cual el bióxido de carbono que existe en el aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos, tales como el hidróxido de calcio, para formar carbonatos.

Cemento Portland:

Aglutinante hidráulico producido por la pulverización del clinker y sulfatos de calcio.

Ceniza Volante:

Residuo finamente dividido que resulta de la combustión de carbón mineral molido o pulverizado.

Clinker:

Es el material granular constituido principalmente de silicato y aluminato de calcio, resultante de la cocción a una temperatura del orden de 1450 °C y enfriamiento posterior de materias primas de naturaleza calcárea y arcilla.

Colado:

Colocación y consolidación del concreto fresco.

Compactación:

Es el proceso mediante el cual se reacomodan las partículas sólidas del concreto fresco para reducir los vacíos. Usualmente se realiza por vibración, centrifugado Apisonado o alguna combinación de estos.

Concreto:

Es un material pétreo artificial, obtenido de la mezcla en porciones determinadas del cemento, agregados, agua y aditivos.

Consistencia:

Es el grado de plasticidad del concreto fresco o del mortero para fluir. La forma usual de medirlo es el revenimiento para el concreto, flujo o lechada para el mortero y resistencia a la penetración de la pasta de cemento.

Contracción:

Disminución del volumen en el concreto causado por pérdida de agua, cambio químico y temperatura a través del tiempo.

Curado:

Es el mantenimiento de un ambiente favorable (humedad y temperatura) para la continuación de las reacciones químicas entre el cemento y el agua dentro del concreto.

Durabilidad:

Las características del concreto de resistir la acción de la intemperie, ataque químico y sus condiciones.

Esfuerzo:

Magnitud de fuerzas internas por unidad de área producidas por cargas externas.

Fraguado:

La condición alcanzada por una pasta de cemento, mortero o concreto cuando pierde plasticidad, usualmente medida en términos de resistencia a la penetración o deformación.

Granulometría:

La distribución de partículas de un material granular en tamaños definidos expresada en porcentaje.

Hidratación:

Formación de compuestos por la combinación química del agua y el cemento.

Puzolana:

Un material silíceo ó sílico aluminoso que por si solo posee poco o ningún valor cementante. Pero en forma finamente dividido y en presencia de humedad, es químicamente reactivo con hidróxido de calcio a temperatura ordinaria para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

Resistencia a la Flexión:

Es la oposición que presenta un elemento o miembro estructural a sollicitaciones de fuerzas combinadas de tensión y compresión.

Revenimiento:

Una medida de la consistencia de un concreto fresco.

Rigidez:

Resistencia a la deformación.

Sangrado:

Es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos: cemento, arena y piedra dentro de la masa.

Segregación:

Es la separación de los constituyentes de un todo ordenado, de modo que la distribución de los tamaños de las partículas deja de ser uniforme.

Trabajabilidad:

Es la facilidad o dificultad que presenta un concreto para colarlo, compactarlo y darle acabado superficial en función del elemento de que se trate y del equipo que disponga.

Bibliografía

Soroka, I., "Concrete in Hot Environments", National Building Research Institute, Faculty of Civil Engineering, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, Published by E & FN Spoon, an imprint of Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK, First edition 1993.

Metha, K., Monteiro, P., "Concreto, Estructuras, propiedades y materiales", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., 1998

Rivera, R., "Durabilidad del Concreto", Memoria del Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto, organizado por la Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey N.L.México, págs. 283-298, 1993.

Mamlouk, M., Zaniewski, J., "Materials for Civil and Construction Engineers", Addison Wesley Longman, Inc., Menlo Park, California, 1999.

Mena, M., UNAM, "Comisión Federal de Electricidad Manual de Tecnología del Concreto", sección 1,2,3., Editorial Limusa, México, 1994.

CNIC, "Colado del Concreto en Clima Caluroso", Elaborado por el Comité ACI 305, Fundación de la Industria de la Construcción, 1994.

Kosmatka, S., Panarese, W., "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., 1992.

IMCYC., "Tecnología del Concreto" Instituto mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., 1992.