CONTROL DE CALIDAD Y USO DE ADITIVOS QUIMICOS EN EL HORMIGON

Por:

Orlando Giraldo Bolívar
Ingeniero Civil
Profesor: Tecnología del Hormigón
Universidad Nacional de Colombia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL
SECCIONAL DE MEDELLIN

1991

UNAL-Medellín
6 4000 00017634 0

620.1
G47

INDICE

Pág.

1. CONTROL DE CALIDAD DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGON 1
1.1 INTRODUCCION 1
1.2 VARIABLES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA DEL HORMIGON 5
1.3 ANALISIS DE DATOS. CARTAS DE CONTROL DE CALIDAD 10
1.4 CRITERIOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL HORMIGON 14
1.4.1 Comité Conjunto C.E.B., C.I.B., F.I.P., RILEM 14
1.4.2 Criterios según el A.C.I. 214 (CCCSR 1400) 20
1.4.3 Ejemplo de control de calidad total de una construcción 21
1.4.4 Ejemplo de control de calidad interno 27
1.5 ENSAYOS SOBRE EL HORMIGON ENDURECIDO 29
1.5.1 INTRODUCCION 29
1.5.2 Procedimientos para estimar la calidad de un hormigón en una estructura 30
1.5.3 Relaciones experimentales entre los diferentes métodos de medida de la resistencia del hormigón de una estructura y el f'c 30
1.5.3.1 Número de rebote 31
1.5.3.2 Resistencia a la penetración 32
1.5.3.3 Extracción de núcleos
2. ADITIVOS QUIMICOS PARA EL HORMIGON 34
2.1 INTRODUCIION 34
2.2 DEFINICION DE ADITIVOS 35
2.3 HISTORIA 35
2.4 IMPORTANCIA EN EL USO DE LOS ADITIVOS 36

Secretaría Dpto. Ing. Civil Fecha 3/92 $ 901 =

23706

2.5 PREPARACION Y ALMACENAMIENTO 37
2.6 DOSIFICACION DE LOS ADITIVOS 38
2.7 CLASIFICACION DE LOS ADITIVOS 38

2.7.1 Reductores de agua 39
2.7.2 Retardantes 40
2.7.3 Acelerantes 41
2.7.4 Reductores de agua y retardantes 41
2.7.5 Reductores de agua y acelerantes 42
2.7.6 Super reductores de agua 42
2.7.7 Super-reductores de agua y retardantes 43

2.8 OTROS TIPOS DE ADITIVOS 43

2.8.1 Aditivos expansores 43
2.8.2 Aditivos adherentes 44
2.8.3 Aditivos para reducir la permeabilidad 44
2.8.4 Aditivos inclusores de aire 44
2.8.5 Aditivos generadores de gas 44
2.8.6 Aditivos para rellenos 44
2.8.7 Aditivos colorantes 44

2.9 ENSAYOS CON ADITIVOS 45

2.10 RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS 45

2.11 ESPECIFICACIONES SEGUN NORMA A.S.T.M. C-494 46

CURSO TEORICO PRACTICO SOBRE TECNOLOGIA DEL HORMIGON

1. CAPITULO

CONTROL DE CALIDAD DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGON

1.1 INTRODUCCION

Han transcurrido ya aproximadamente 140 años desde la aparición del primer código sobre construcciones con hormigón armado; fué precisamente en Alemania donde Köenen públicó las primeras bases para el cálculo de estructuras en hormigón Armado[1]. A partir de esta fecha se han desarrollado grandes innovaciones tecnológicas para el diseño y control del hormigón. Merecen especial atención los trabajos del Ingeniero francés René Feret[2] a fines del siglo pasado (1896) quien concluyó, después de un extenso programa experimental que la resistencia del hormigón dependía de la relación del volumen absoluto de cemento (Vc) a la suma de los volúmenes absolutos de cemento (Vc), agua (Vw) y aire (Va): $Rc = K\ Vc/(Vc + Vw + Va)^2$, donde K es una constante

experimental. Más adelante 1918 el Ingeniero norteamericano Andrew, D. Abrams[3] publicó los resultados obtenidos en sus investigaciones, donde concluyó que la resistencia del hormigón era fundamentalmente dependiente de la relación agua-cemento, $Rc = (K_1)/(K_2)^{A/C}$ donde K_1 y K_2 son constantes experimentales. En estos trabajos previos se puede notar como indirectamente los ingenieros trataban de controlar la resistencia del hormigón, ya sea mediante la relación volumen de cemento a volumen de pasta conglomerante o por la conocida relación A/C. Sin embargo no fué sino hasta después de 1920[4] cuando se pudieron aplicar las técnicas estadísticas al control de calidad de la resistencia del hormigón. De hecho ya se conocía la naturaleza variable de su resistencia; lo que se trataba era de encontrar un modelo matemático para explicar su variabilidad y definir la resistencia en términos estadísticos.

Actualmente todas las especificaciones vigentes están de acuerdo en que la calidad del hormigón se debe controlar preferiblemente sobre probetas testigo tomadas durante el hormigonado, para definir los criterios de aceptación o rechazo del material. Sin embargo es muy frecuente encontrar casos donde hay duda acerca de la aceptación de ciertos resultados de resistencia, por lo que las especificaciones permiten el uso de métodos indirectos para complementar los resultados obtenidos con los métodos normalizados, y definir

definitivamente el camino a seguir en la construcción.

En conclusión el control de calidad se debe hacer siguiendo los lineamientos propuestos por las organizaciones que tradicionalmente han trabajado extensamente en este tema, en nuestro caso se han utilizado los métodos propuestos por el comité 214 del A.C.I.[5]

Los tipos de probetas testigos normalizados por las diferentes normas para ensayos a compresión son: El cubo (Alemania Inglaterra), el cilindro (U.S.A., Francia, Canadá, Australia). El cubo de arista igual a 15 cm. es el más utilizado siempre y cuando el tamaño máximo del agregado no fuese mayor de 40mm ($1^1/_2$ pulg.). El cilindro de 15 cm de diámetro y 30 cm. de altura es el tradicionalmente utilizado para evaluar la resistencia a la compresión del hormigón cuando tiene agregados de tamaño menor o igual a 40 mm.

El objetivo de las pruebas de resistencia del hormigón es determinar si el material cumple o no con las especificaciones de resistencia dadas en el proyecto, y al mismo tiempo medir la variabilidad en la producción del hormigón. El hormigón por naturaleza es un material heterogéneo y por ende está sujeto a la influencia de numerosas variables. Las características de cada uno de los ingredientes del hormigón, dependiendo de su variabilidad, pueden causar variaciones en

la resistencia del hormigón. Se pueden involucrar variaciones además por los métodos usados en la dosificación, mezclado, transporte, colocación y curado. Además de las variaciones del mismo hormigón, se pueden introducir más variaciones por el proceso de fabricación, ensayo y tratamiento de las probetas. Es importante aclarar que las variaciones en la resistencia del hormigón deben aceptarse; pero un hormigón de buena calidad solo puede ser producido sí se mantiene un riguroso control de las variables, y por lo tanto los resultados de los ensayos pueden interpretarse correctamente[5].

El concepto de Control Estadístico de Calidad del Hormigón va mucho más allá de lo que inicialmente se piensa. Tanto la resistencia de los materiales (medida por su tensión máxima, última o elástica según los criterios utilizados) como las solicitaciones a que estas están sometidos son variables aleatorias; es por esto que un enfoque probabilístico es imprescindible si se quiere analizar el comportamiento real de los materiales bajo carga. De hecho si se conocen las funciones de densidad de probabilidad de la resistencia del material y de las solicitaciones, se puede determinar la probabilidad de falla de una estructura. Esta probabilidad de falla está asociada a las consecuencias técnicas, económicas y sociales, que trae el colapso de una estructura[6]. En consecuencia se debe especificar en términos probabilísticos la resistencia de los materiales y las cargas a que

estos se ven sometidos. Actualmente el enfoque completamente estadístico no puede realizarse por falta de conocimientos acerca de las distribuciones de frecuencia de las cargas y la resistencia de los materiales, pero las normas modernas introducen esta filosofía a través del concepto de resistencia características y carga característica y el uso de coeficientes parciales de seguridad, basados en estudios estadísticos. En definitiva ante todas las variaciones que entraña la construcción de cualquier estructura, resulta imprescindible establecer unos claros criterios con el fin de interpretar correctamente los resultados obtenidos, de tal forma que la probabilidad de falla no sea superada en ninguna fase de la construcción. Para ello se debe implementar un cuidadoso control de calidad del hormigón (que es el material objeto de este curso) ya que este parámetro puede influir mucho más en la probabilidad de falla de la estructura que los refinamientos de cálculo y diseño y otros aspectos en la etapa inicial del proyecto[6].

1.2 Variables que afectan la resistencia del hormigón. (f'c)[7] (Journal A.C.I. Vol. 47 Nº6 1951 "Price")

Se ha estimado que existen aproximadamente 60 variables que influyen en la resistencia de un cilindro de hormigón, entre otras podemos enumerar:

a. Cambios en la relación A/C: Por mal control del agua de mezclado, o excesiva variación de humedad del agregado, o por retemplado*.

b. Variaciones en el contenido de agua: Por la granulometría del agregado, absorción y forma de las partículas, el tipo de cemento y el uso de aditivos, el contenido de aire, la temperatura y el tiempo de entrega.

c. Variaciones en las características y proporciones de los componentes del hormigón: Agregados, cemento, agua, aditivos.

d. Variaciones en el transporte, colocación y compactación.

e. Variaciones en la temperatura y el tiempo de curado.

f. Variaciones durante el muestreo.

g. Variaciones por las diferentes técnicas de fabricación.

h. Variaciones por fabricación y curado de las probetas testigo.

i. Variaciones por el tipo y calidad de las formaletas.

j. Variaciones por cambio en su curado: temperatura, hume-

* Retemplado: Es la adición de agua a la mezcla y el posterior remezclado cuando el hormigón o mortero han perdido parcialmente las características plásticas y ha comenzado a fraguar.

dad, acarreo de las probetas.

h. Variaciones por deficientes métodos de ensayo: refrentado de las probetas, pruebas a compresión.

De las anteriores variables podemos resaltar algunas de ellas, que consideramos, tienen un efecto especial en la resistencia del hormigón , veamos:

La relación agua-cemento: Aúnque la resistencia del hormigón depende ampliamente de la porosidad capilar o relación gel-espacio de la pasta, esta cantidad en la práctica no es de fácil determinación o predicción. Sin embargo se ha comprobado experimentalmente que la porosidad capilar de un hormigón completamente compactado en cualquier grado de hidratación está determinada por la relación agua-cemento. Es por ello que en la práctica nosotros podemos establecer que la resistencia de un hormigón completamente compactado es función para determinada edad de la relación agua-cemento. Se han formulado numerosas relaciones para este fin a partir de la ecuación de Abrams, indicándonos que a >r A/C menor resistencia y viseversa.

A pesar de que la regla de la relación A/C ha sido ampliamente utilizada, adolece de serias desventajas técnicas que en los últimos años se han tratado de resolver; en ella no

se considera el grado de hidratación del cemento, el contenido de aire, el efecto de los agregados, etc. Es por ello que no se puede normalizar una relación exacta f'c Vs A/C.

Más aún, a pesar de nosotros especificar una determinada relación A/C en una mezcla, existe cierta incertidumbre de cual es la verdadera A/C utilizada al colocar el hormigón. En la práctica sólo el ensayo de asentamiento nos da un indicio de la cantidad de agua adicionada realmente, ya sea porque los agregados afectaron el valor calculado o porque deliveradamente se agregó más agua para facilitar el manejo del hormigón. Pero este ensayo no cuantifica el valor del A/C usada, para ello se han desarrollado técnicas más complejas como la de Kelly-Vail[7]

La edad: No sólo el conocimiento de que la relación gel-espacio controla la resistencia, es suficiente para analizar el comportamiento mecánico del hormigón; el tiempo es una variable importante ya que la rata de hidratación es función del tipo de cemento, y condiciones de curado. La ganancia de resistencia con el tiempo depende también de la A/C, a menor A/C las mezclas ganan más rápidamente resistencias que a mayores relaciones A/C. Esto se debe a que la resistencia depende del cubo de la porosidad capilar[2](Neville), $R=Kx^3$ donde x = relación gel/espacio = $(0.647\,\alpha)/(0.319\alpha + A/C)$. K = cte. experimental = 2390 kgf/cm^2 α: grado de hidratación .

Ejemplo: Si α = 100% y $\frac{A}{C}$ = 0.45 R = 2390 x X^3 = 2390x0.84^3= 1423 kgf/cm^2.

En la práctica no se logra el 100% de hidratación, bajo condiciones normales en el mejor de los casos se puede llegar a un 70% = R = 727 kgf/cm^2 bajo las condiciones anteriores.

Como regla general se especifica una resistencia del hormigón a 28 días/

MADUREZ: La hidratación del cemento está fuertemente afectada por el tiempo y la temperatura, por lo que la ganancia de resistencia está controlada también por estos dos factores. Numerosas investigaciones se han realizado para comprobar estas relaciones, logrando grandes avances tecnológicos en este campo. El concepto de madurez del hormigón se define como función del producto temperatura de curado "T", y tiempo de curado "t" (Por ejemplo Madurez = f(Txt). La hipótesis fundamental es que para una mezcla de hormigón existe una relación directamente proporcional entre Madurez y Resistencia.

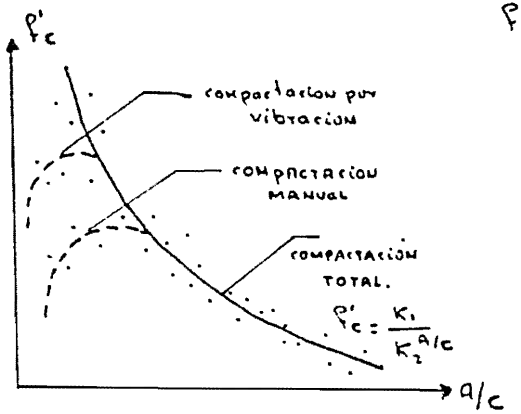
$$M = \int (T - To)dt$$

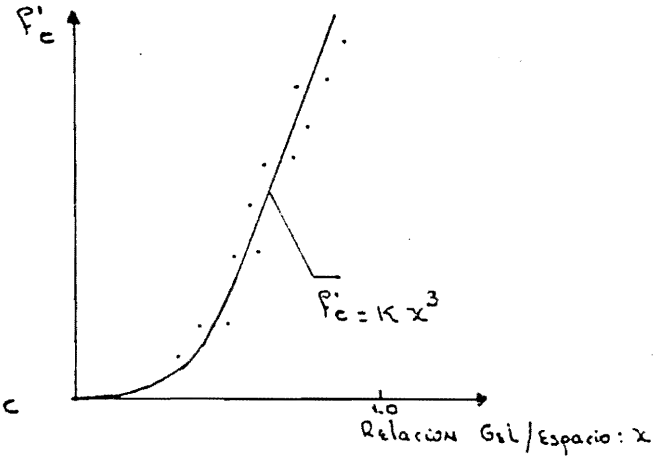
$$To = -12.2°c$$

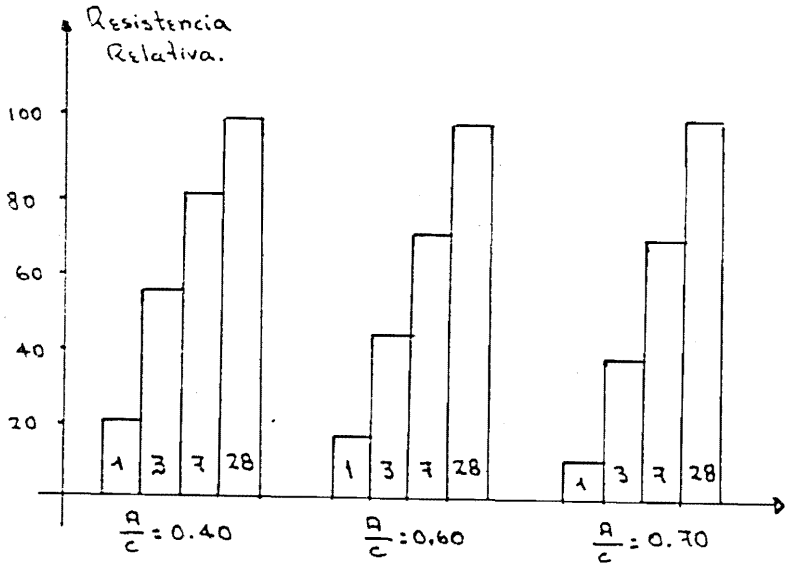
Se han realizado expresiones de la forma: R = A + B log(M)

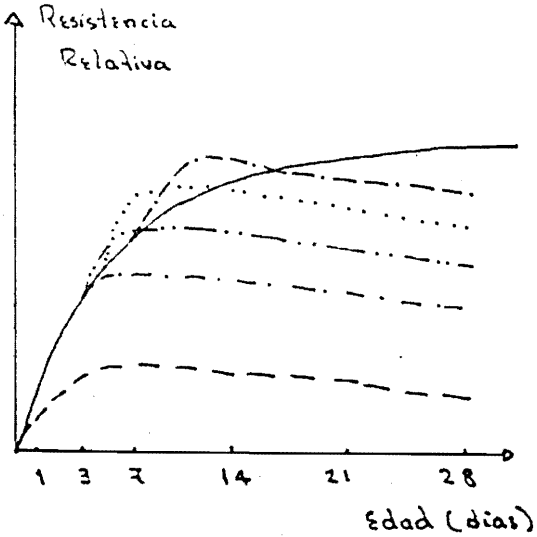
Ejemplo: R = - 175 + 76,5 ln M

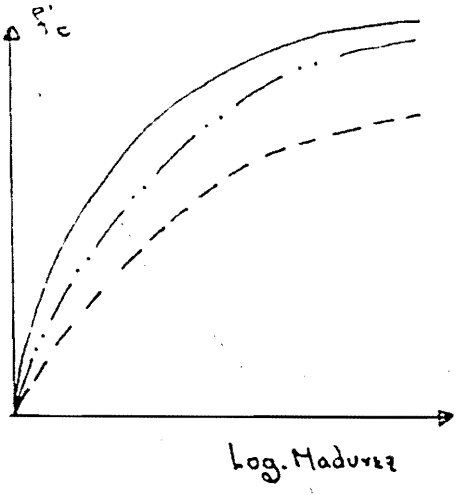
VARIABLES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA DEL HORMIGON

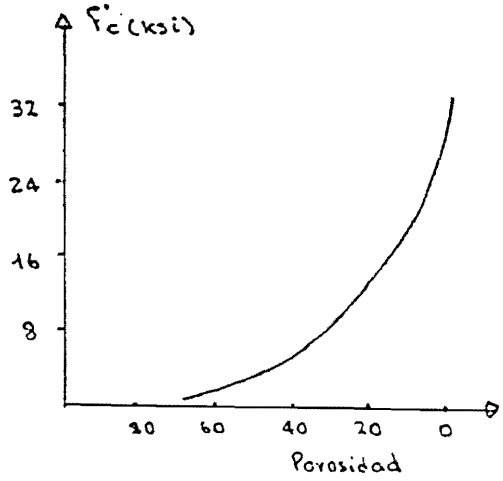


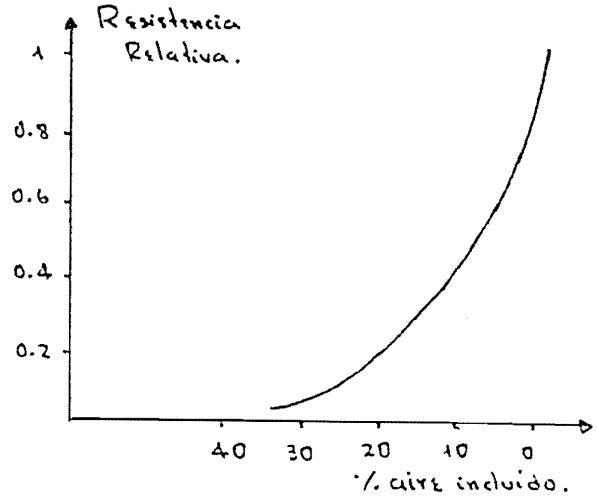


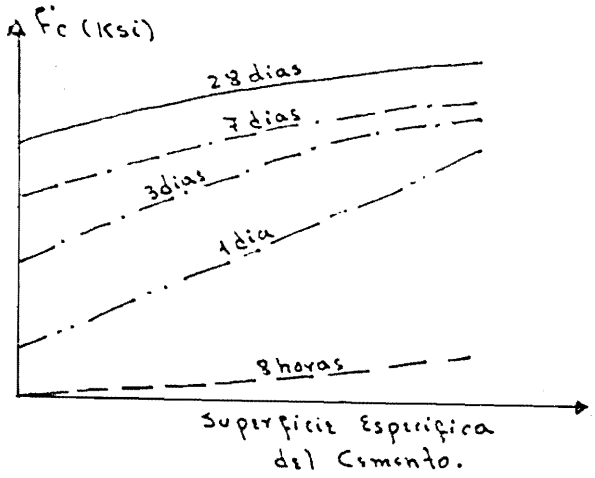


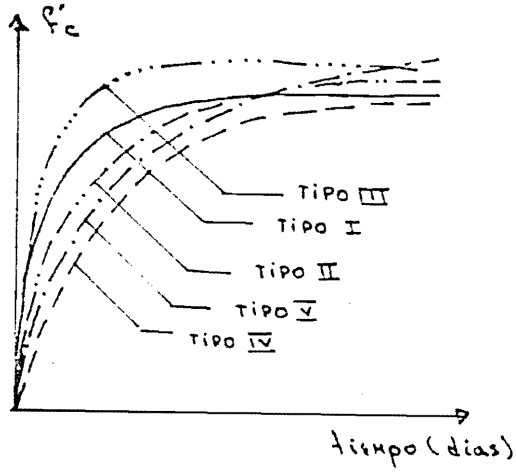


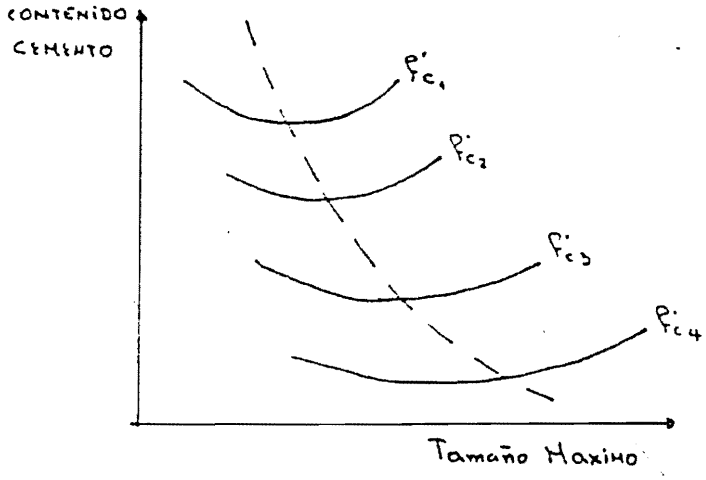


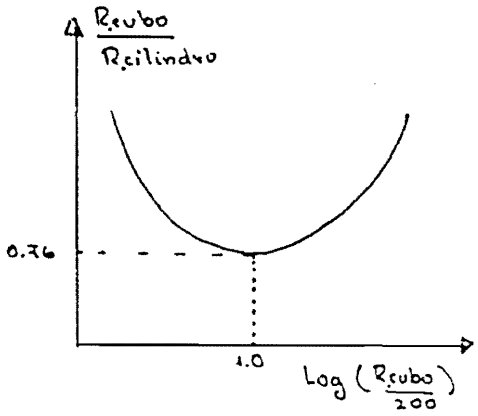

f'c (ksi)
32
24
16
8
80
60
40
20
0
Porosidad

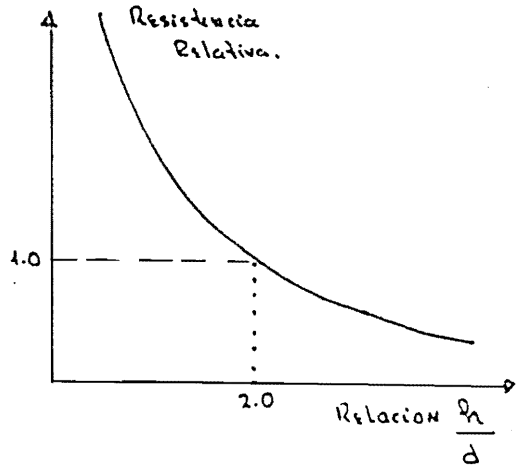

Resistencia Relativa.
1
0.8
0.6
0.4
0.2
40
30
20
10
0
% aire incluido.

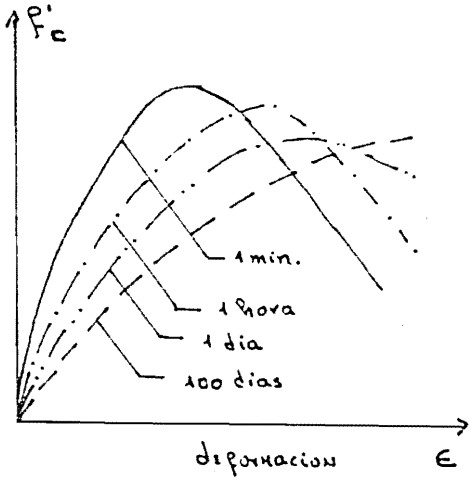

f'c (ksi)
28 dias
7 dias
3 dias
1 dia
8 horas
Superficie Especifica del Cemento.

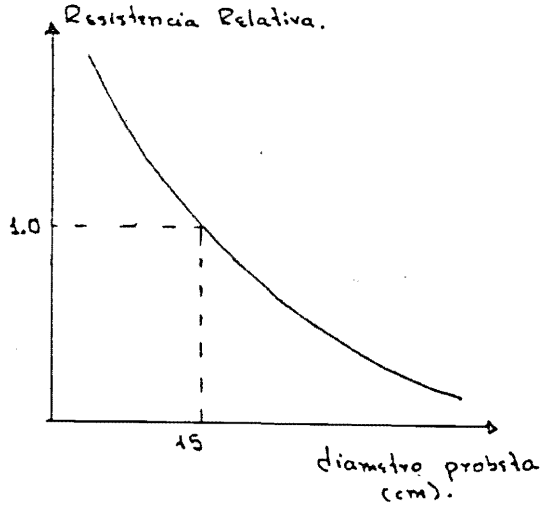

f'c
TIPO III
TIPO I
TIPO II
TIPO V
TIPO IV
tiempo (dias)

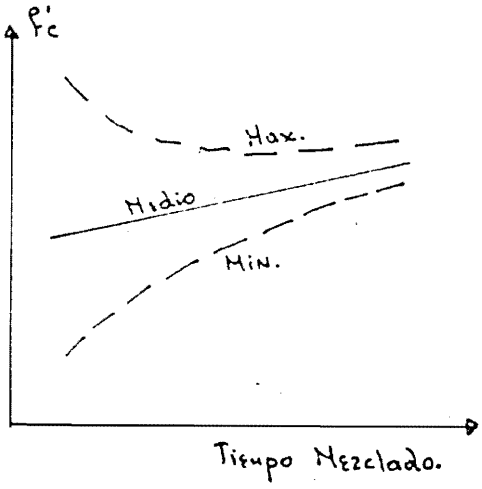

CONTENIDO CEMENTO
f'c1
f'c2
f'c3
f'c4
Tamaño Maximo

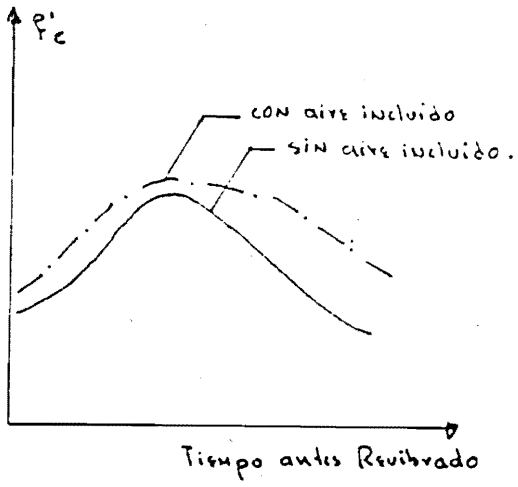

Rcubo / Rcilindro
0.76
1.0
Log (Rcubo / 200)

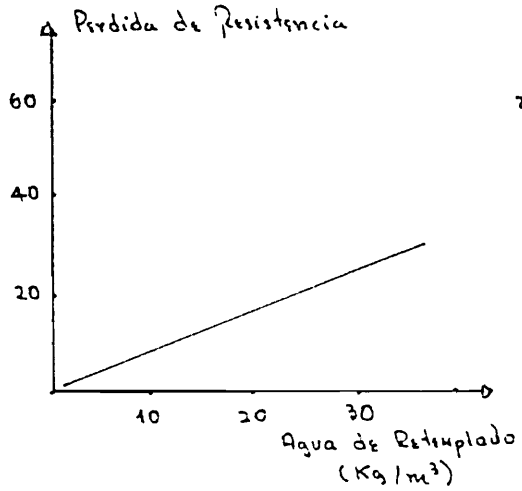

Resistencia Relativa.
1.0
2.0
Relacion h / d

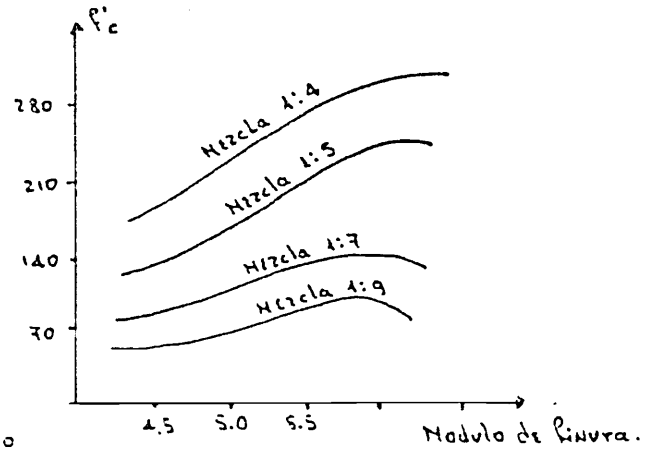

f'c
1 min.
1 hora
1 dia
100 dias
deformacion ε

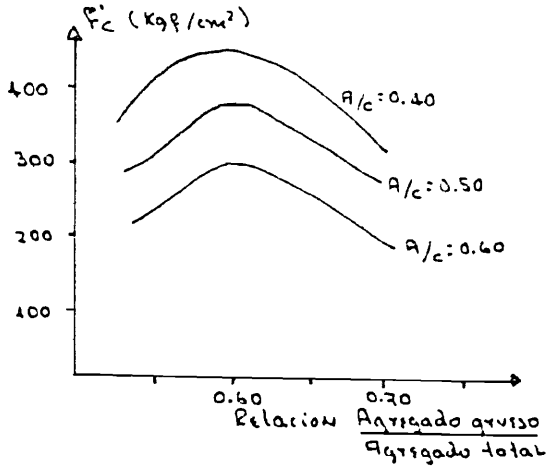

Resistencia Relativa.
1.0
15
diametro probeta (cm).

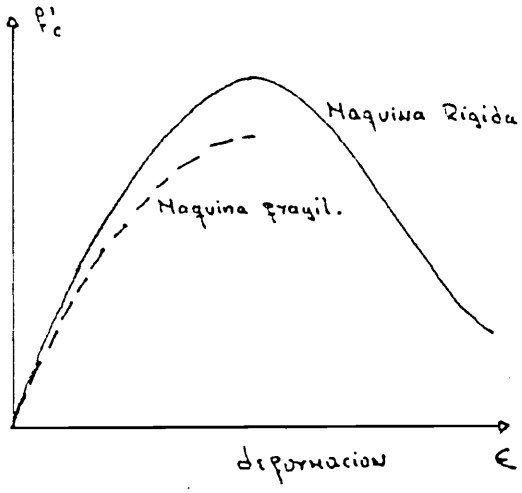

f'c
Max.
Medio
Min.
Tiempo Mezclado.

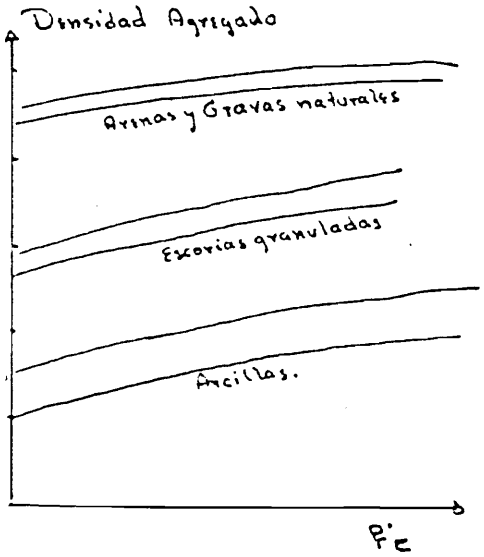

f'c
CON aire incluido
SIN aire incluido.
Tiempo antes Revibrado

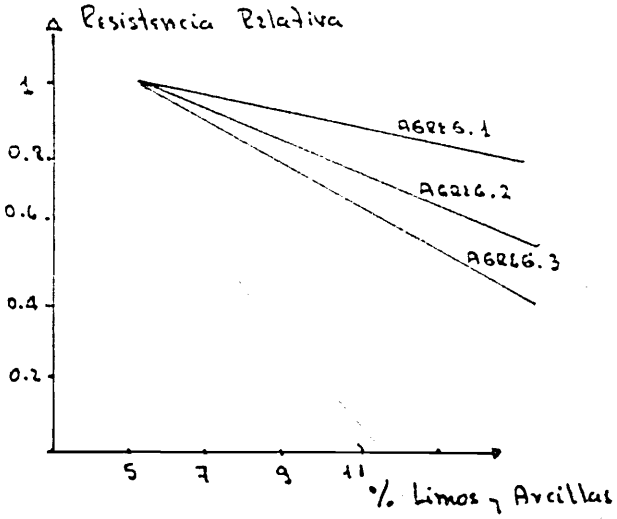

Perdida de Resistencia
60
40
20
10
20
30
Agua de Retemplado
(Kg/m³)


f'c
280
210
140
70
Mezcla 1:4
Mezcla 1:5
Mezcla 1:7
Mezcla 1:9
4.5
5.0
5.5
Modulo de Finura.


f'c (Kgf/cm²)
400
300
200
100
A/c: 0.40
A/c: 0.50
A/c: 0.60
0.60
0.70
Relacion Agregado grueso / Agregado total


f'c
Maquina Rigida
Maquina frayil.
deformacion
ε


Densidad Agregado
Arenas y Gravas naturales
Escorias granuladas
Arcillas.
f'c


Resistencia Relativa
1
0.8
0.6
0.4
0.2
AGREG. 1
AGREG. 2
AGREG. 3
5
7
9
11
% Limos y Arcillas

Ejemplo: Si M = 278°c x día R = 255 kgf/cm²

Cemento: La composición química del cemento y su finura afectan la resistencia del hormigón, así: a mayor C_3S mayor resistencia los primeros días a mayor C_2S mayor resistencia a edades posteriores, a mayor finura mayor resistencia los primeros días y viseversa.

Agregados: La forma y granulometría del agregado, la textura y el tamaño, las impurezas y la petrografía.

1.3 ANALISIS DE DATOS DE RESISTENCIA. CARTAS DE CONTROL DE CALIDAD

1.3.1 Universo, población y muestra:

Las palabras universo y población son usadas como sinónimos por varios autores, definiéndola "como el conjunto de elementos que tienen alguna característica común: "En análisis de datos, las normas A.S.T.M. prefieren la definición dada por Ostle, donde se define el universo, como un grupo específico objetos y la población como todos los posibles valores con una característica particular para el grupo especificado. El universo puede ser una colección real o imaginaria de elementos; puede ser finito o infinito; obviamente ese universo puede tener varias poblaciones asociadas con él. Como ejemplo

el universo pueden ser todos los cilindros de 15 x 30 cm. tomados de un hormigón premezclado, la característica podría ser: su resistencia a la compresión, su durabilidad ante congelamiento y deshielo, o contenido de aire; la colección de estas medidas constituye la definición de población.

Considerando ahora sólo la medidas numéricas, cada población de valores tendrá un valor medio, una desviación estándar y un coeficiente de variación. Estos valores de la población se designan comunmente con una prima, entonces tenemos: desviación estándar población σ' media población $\bar{x}'$ y coeficiente de variación de la población: V'.

Una muestra es una parte de una población seleccionada según alguna regla o plan. Es importante resaltar que generalmente uno trabaja con una muestra para luego estimar los valores de la población. Bajo este punto de vista dos preguntas se deben resolver: (1) Como se debe seleccionar la muestra y (2) Qué tan ajustados están los valores obtenidos en la muestra con los valores correctos.

En el primer caso: Se sabe que el objetivo principal en la evaluación de datos es generalizar los resultados de la muestra a la población y esto solo se logra si se aplican las leyes de las probabilidades, por lo que se debe usar un nuestreo

estadístico. Este último se puede obtener numerando los elementos y utilizando una tabla de números aleatorios.

En el segundo caso: Se deben utilizar las propiedades de las distribuciones de frecuencia que más adelante analizaremos.

1.3.2 Variables estadísticas:

Promedio aritmético: $\overline{X} = (\sum_{i=1}^{n} X_i)/N$ donde X_i: son los resultados de resistencia de las pruebas individuales y N: Número de pruebas efectuadas.

Desviación estándar: $\sigma = (\sum_{i=1}^{N} (X_i - \overline{X})/_{N-1})^{0.5}$: Es una medida de la dispersión de los datos respecto al promedio.

Coeficiente de variación: $V = (\sigma/\overline{X}) \times 100$: Es el porcentaje de dispersión de la desviación respecto al promedio (se debe usar para iguales promedios).

Rango: R : (Xmax - Xmin). Variabilidad de los resultados

Experimentalmente se ha comprobado que los resultados de resistencia de cilindros de hormigón en proyectos controlados tiene una función de densidad de probabilidades normal o gaussiana, cuya ecuación es de la forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\ \sigma} e^{-\frac{(X_i-\overline{X})^2}{2\sigma^2}} \quad \text{para} \quad -\infty < \chi < \infty$$

Una propiedad importante de esta función es que el área bajo la curva representa la probabilidad de que la variable X esté entre $-\infty$ y $+\infty$, y esta vale 1

$$Pr(-\infty < \chi < \infty) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1.0$$

En el hormigón nunca tendremos resistencias negativas. Se trabajan siempre con valores positivos.

Por ejemplo $\quad Pr(f'c_1 < f'c < f'_{c2}) = \int_{f'c_1}^{f'c_2} f(f'c) \times df'c$

Para propósitos de cálculo generalmente cuando σ y χ son constantes se puede hacer un cambio de variable:

$$Z = \frac{f'_{ci} - \overline{f}'_c}{\sigma} \quad y \quad \frac{dz}{df'_c} = \frac{1}{\sigma}$$

$$Pr(Z_1 < Z < Z_2) = \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-Z^2/2} dz$$

La aplicación de la Ecuación anterior es importante en el análisis estadístico: Dada una probabilidad hallar el valor Z o vicerversa. (Más adelante se explicará con un ejemplo).

VALORES DEL COEFICIENTE DE VARIACION DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGON (V) PARA DIFERENTES TIPOS DE CONTROLES [5]

Coeficiente de Variación (V%)		Grado de Control
	Ensayos totales*	
Laboratorio	Campo	
< 5	< 10	Excelente
5 - 7	10 - 15	Bueno
7 - 10	15 - 20	Regular
> 10	> 20	Pobre
	Ensayos Internos**	
Laboratorio	Campo	
< 3	< 4	Excelente
3 - 4	4 - 5	Bueno
4 - 5	5 - 6	Regular
> 5	> 6	Pobre

* Cuando se trabaja con varias muestras de hormigón (más de 15) falladas periódicamente.

** Cuando se trabaja con una muestra de hormigón (más de 2 cilindros) fallados simultáneamente.

Cartas de Control de Calidad: Son gráficas utilizadas por las industrias manufactureras con el fin de reducir la variabilidad en la producción e incrementar la eficiencia. Se recomiendan cuando existe una producción continua de hormigón a lo largo de períodos considerables de tiempo. Generalmente se trabajan con tres tipos de gráficas: (Ver figura).

a. Carta para pruebas individuales de resistencia

b. Carta para el promedio variable de la resistencia. (Grupos de 3, 4, 5, ... etc.)

c. Carta para el promedio variable para un intervalo (tiempo).

1.4 CRITERIOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL HORMIGON (Diagrama de flujo)

1.4.1 Comité Conjunto C.E.B., C.I.B., F.I.P., RILEM[6]:

Es bien conocido que la resistencia del hormigón medida sobre probetas testigo no tiene un valor único, sino un valor variable según los diferentes parámetros involucrados en la medida. Experimentalmente se ha comprobado que si el hormigón se fabrica bajo condiciones controladas la distribución

RESULTADOS DE ENSAYO DE CILINDROS - CUADRO GENERAL

OBRA _____

CONSTRUCTOR _____

INTERVENTOR _____

FECHA DE _____

A _____

LABORATORIO _____

HOJA Nº

FECHA	HORA	CILIND Nº	MUESTR Nº	MEZCLA	OPERAR	ASENT CM	EDAD ENSAY	PESO KG	RESIST KG/CM²	RANGO KG/CM²	LOCALIZACION	OBSERVACIONES

RESULTADO DE ENSAYO DE CILINDROS

RESUMEN DE LA MEZCLA _____

OBRA: _____ FECHA DE _____ HOJA Nº

CONSTRUCTOR: _____ A _____

INTERVENTOR: _____ LABORATORIO _____

			RESISTENCIA PROMEDIO (KG. / CM²)					
FECHA	MUESTRA Nº	ASENT CM	1 DIA	7 DIAS	ESTIM.ª 28 DIAS	MEDIDA 28 DIAS	RANGO KG/CM²	OBSERVACIONES

FORMA C-2

RESULTADOS DE ENSAYO DE CILINDROS
GRAFICO DE CONTROL PARA LA MEZCLA

OBRA _____

CONSTRUCTOR _____

INTERVENTOR _____

FECHA DE _____

A _____

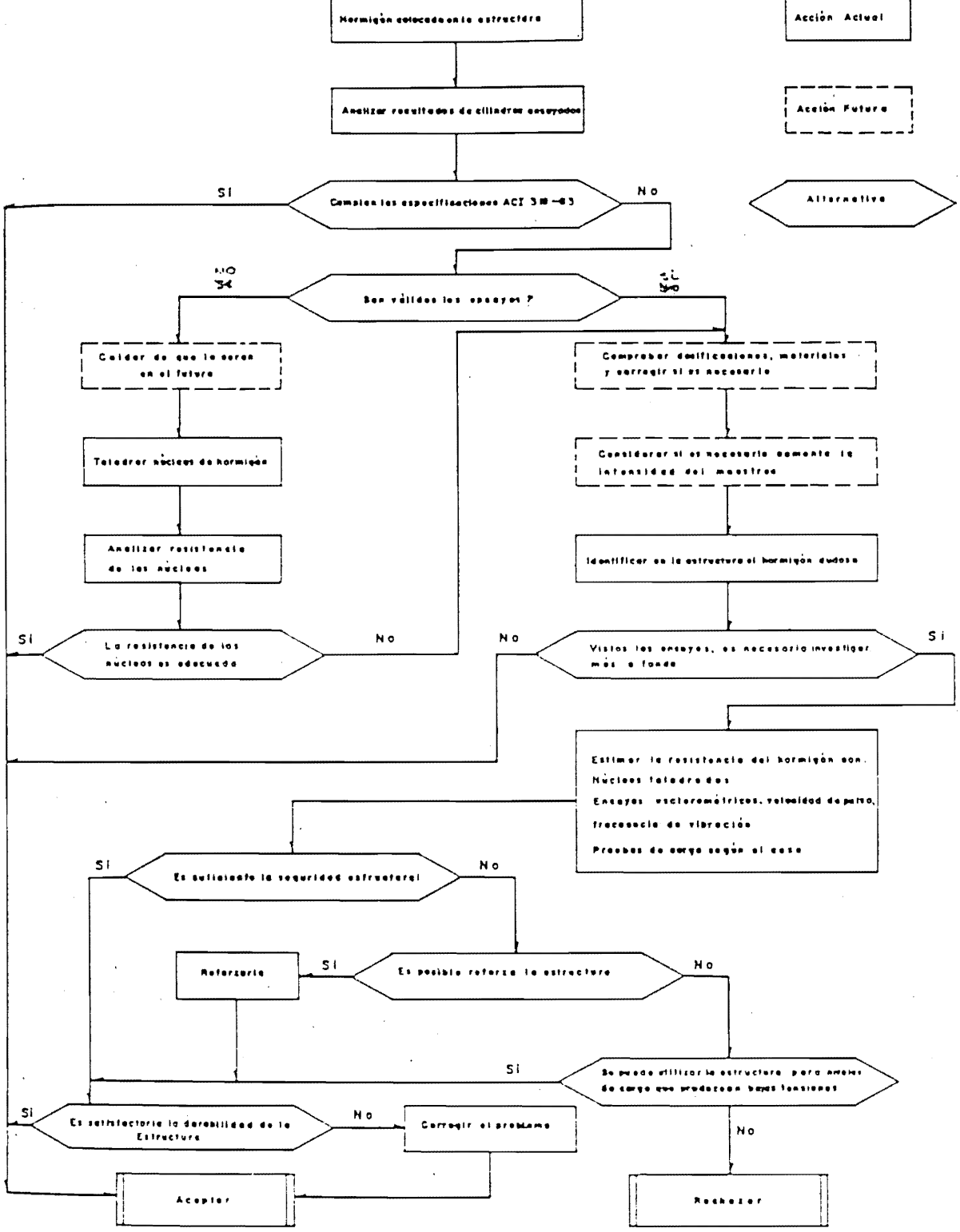
LABORATORIO _____

HOJA Nº

PROMEDIO DE 3 ENSAYOS CONSECUTIVOS.			ENSAYOS INDIVIDUALES (Cada ensayo consta del promedio de dos cilindros)
RESISTENCIA (KG/CM²)	AÑO	MES	MUESTRA Nº	RESISTENCIA (KG/CM²)

FORMA C-3

INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO ICPC Apartado aéreo 52816 MEDELLIN Apartado aéreo 19091 BOGOTA



Diagragma de flujo del control de calidad del hormigón en obra

de esta población puede considerarse normal (Gaussiana) y describirse completamente con 2 datos. La media aritmética y la desviación típica. Muchas especificaciones simplifican la descripción de la distribución de resistencia reduciendo los dos parámetros anteriores a uno solo llamado valor característico de la resistencia del material. Este valor se define como aquel valor de la resistencia por debajo del cual se espera que caiga un porcentaje muy bajo de valores de la variable analizada. El criterio normalmente utilizado para la aceptación o rechazo de un hormigón se basa en la probabilidad de falla de la estructura construida con el material. Esta puede a su vez describirse como una combinación de los siguientes factores:

a. La probabilidad de que el hormigón realmente preparado sea incapaz de soportar una solicitación perteneciente a la distribución de solicitaciones considerada por el calculísta.

b. La frecuencia relativa con que la calidad del hormigón es producida y presentada para aceptación.

c. La probabilidad de que la calidad del hormigón sea aceptada.

En resumen el requisito probabilístico de seguridad será sa-

satisfecho si el producto de estas tres probabilidades es inferior a la probabilidad de falla, implícita en los cálculos estructurales (según los factores de seguridad tanto para las cargas como para las resistencias de los materiales).

Toda obra civil lleva implícita tres funciones muy claramente establecidas: El Proyecto, la Producción y la Aceptación y tienen una finalidad común: "Producir una obra segura y económica". A nivel internacional estas tres funciones se admitirán en formas diferentes. Por ejemplo en algunos países el proyecto, la producción y la aceptación están a cargo de una sola autoridad: El Ingeniero. En otros casos sólo el proyecto y la aceptación son funciones del ingeniero y el contratísta de la producción. En general estas tres actividades deben estar claramente reguladas con objeto de ordenar diferentes intereses y responsabilidades, sin perder de vista la interacción que existe entre ellas. Veamos un resumen de lo que se exige en cada una de estas etapas:

a. Prescripción del Proyecto: En esta etapa el proyectista, debe definir unas especificaciones claras y explícitas sobre la calidad de los materiales, los métodos de fabricación y las características generales de los materiales. Esto con el fin de evitar posteriores confuciones en la etapa de producción y aceptación del hormigón

El proyectista debe definir la resistencia característica del hormigón, la edad de fallo, condiciones de curado, y las formas de especificar el hormigón (ya sea por dosificación proyectada, Normalizada o impuesta).

b. Control de producción: En esta etapa el productor debe garantizar que su producto cumple con las especificaciones fijadas en la etapa de proyecto. Para ello el debe mejorar la uniformidad de los materiales usadas en la preparación del hormigón, el mezclado, el transporte, etc., esto con el fin de mejorar su control de calidad, durante esta etapa se deben utilizar los siguientes criterios:

1. El productor del hormigón está en libertad de elegir un método de fabricación adecuado para el hormigón siempre y cuando cumpla con lo especificado. Para ello se deben vigilar las características de los materiales y el proceso de fabricación del hormigón. Se debe proteger el cemento y evitar mezclas de diferentes tipos de cementos. El agregado como mínimo debe estar separado en 2 fracciones arena y grava. En algunos casos se puede utilizar gravilla (mezcla arena + grava), en hormigones de baja resistencia. Los agregados y el cemento se deben medir por peso, admitiéndose el método por volúmenes para

hormigones de menos resistencia. El amasado debe ser mecánico para garantizar uniformidad.

2. El régimen de muestreo se fijará de tal modo que se tomen muestras independientes y al azar, y cuando se cambie la procedencia de un material constituyente del hormigón.

3. Se puede suponer que la f.d.P de la resistencia del hormigón es normal y definida por la media y la desviación típica de la variable.

4. Para el control de producción se recomienda la adopción de un método de curado acelerado de probetas; este debe mantenerse correctamente para conservar la validez de los datos obtenidos.

5. Se puede utilizar alternativamente en la producción un método de análisis rápido del hormigón fresco, para controlar más directamente las variables: contenido de cemento, agua y agregados.

c. Criterios de aceptación rechazo: En este caso el control de aceptación o rechazo difiere del anterior control de producción en dos aspectos principales. Primero en que la responsabilidad de la decisión no

corresponde al productor del hormigón sinó al ingeniero autorizado, que actua en nombre del cliente,y segundo en que la finalidad de la desición es juzgar sobre la aceptación o rechazo de una cierta cantidad de hormigón y no la de juzgar la estabilidad del proceso de producción. Para llevar a cabo esta labor se recomienda los siguientes puntos:

1. Verificar si se cumple la función de aceptación del hormigón. Esto se debe hacer con bases en los resultados de un cierto número de probetas confeccionadas con el hormigón de la muestra. Ejemplo: Si la función de aceptación es de la forma $Z(x) = \overline{X} - \lambda\ \sigma_{n-1}$ donde $Z(x)$ es la resitencia característica, $\overline{X}$: el promedio aritmético de n ensayos individuales, λ: constante que se fija según el grado de seguridad requerido, y σ_{n-1}: desviación típica del conjunto de datos; tenemos entonces que el hormigón se acepta si $Z(x) \geq f'c$ (resistencia especificada en los planos).

2. Utilizar un criterio adecuado para seleccionar las curvas adecuadas de operación característica de tal forma que se obtengan consideraciones económicas y seguras para los diferentes controles de hormigón obtenidos.

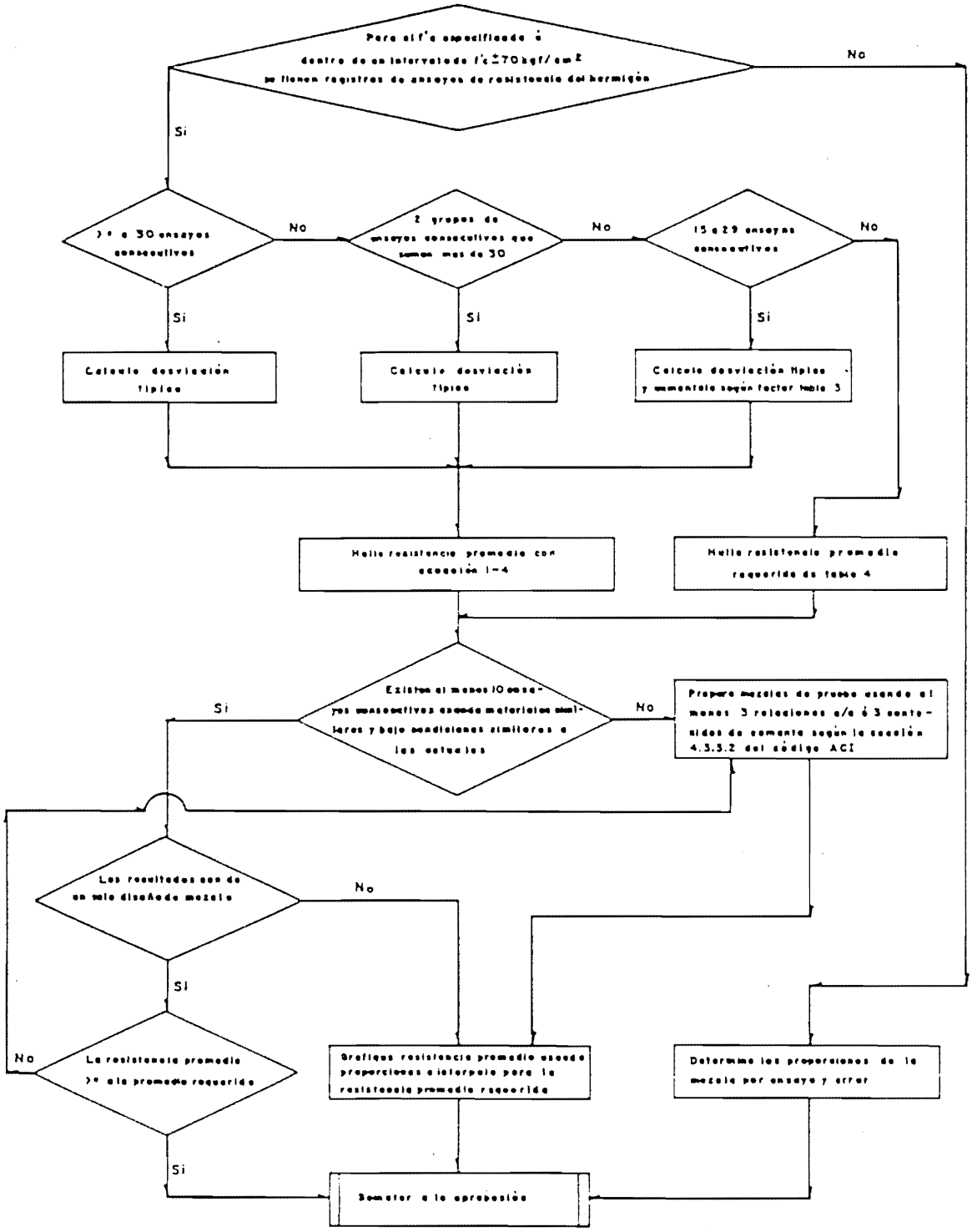
3. Durante el muestreo garantizar unos procedimientos confiables, de tal forma que las muestras tomadas independiente-

mente sean representativas de las correspondientes amasadas y se puedan aplicar las funciones de aceptación fijadas.

4. Definir el tamaño del lote y la frecuencia del muestreo, de tal forma que se obtengan suficientes resultados para el análisis estadístico posterior. A nivel orientativo se puede decir (a). Se debe tomar como mínimo una muestra (2, 3, 4, ... n cilindros) por cada 100 m^3 de hormigón o por cada 50 amasadas. (b). Se debe tomar una muestra por cada día de hormigonado. (c). Si no se conoce la desviación típica debe duplicarse la frecuencia del muestreo. (d). La frecuencia del muestreo será adecuada si diariamente se acepta el hormigón producido, en caso contrario se debe intensificar el muestreo.

1.4.2 Criterios según el A.C.I. 214. (CCCSR-1400)[9]

Los criterios del A.C.I. 214 se fundamentan en dos premisas fundamentales: (a) El hormigón producido debe tener una probabilidad menor del 1% de obtener resultados individuales (2, 3, 4, 5, ... n cilindros), por debajo de f'c-35 (kgf/cm^2). (b) El hormigón producido debe tener una probabilidad menor del 1% de obtener resultados promedios individuales de tres muestras menor de f'c (kgf/cm^2). Ambos criterios tienen en



Procedimiento gráfico para la selección de las proporciones del hormigón según A.C.I. 318-83

cuenta todo lo relacionado con la seguridad y economía que debe cumplir un hormigón de calidad aceptable. En el diagrama de flujo adjunto se resumen los criterios utilizados por el A.C.I. para aceptar o rechazar un hormigón de determinadas características. Según las anteriores premisas del mal (Gauss), el hormigón es aceptable si se cumple simultáneamente:

(a) $\overline{f}cr = f'c - 35 + 2,33\ \sigma_{n-1}$

(b) $\overline{f}'cr = f'c + 1,34\ \sigma_{n-1}$

donde f'cr es la resistencia promedio que debe alcanzar el hormigón producido, y σ_{n-1} es su desviación típica. Veamos algunos ejemplos de los criterios que utiliza el A.C.I. para control de calidad en una muestra de hormigón (control interno), y entre varias muestras de hormigón (control total).

1.4.3 Ejemplo de control de calidad total de una construcción.

Los siguientes son los resultados obtenidos en cilindros de hormigón durante la construcción de una unidad residencial.

El f'c = 210 kgf/cm². Cada resultado es el promedio de 2 cilindros.

MUESTRA No.	f'c (kgf/cm²)	MUESTRA No.	f'c (kgf/cm²)	MUESTRA No.	f'c (kgf/cm²)
1	229	21	260	41	240
2	248	22	272	42	270
3	250	23	225	43	275
4	230	24	240	44	270
5	210	25	260	45	261
6	230	26	258	46	240
7	237	27	240	47	268
8	244	28	280	48	260
9	252	29	275	49	258
10	282	30	265	50	255
11	266	31	260	51	260
12	272	32	290	62	262
13	231	33	238	63	204
14	240	34	268	64	195
15	208	35	256	55	210
16	220	36	275	56	198
17	260	37	260	57	216
18	240	38	290		
19	260	39	242		
20	240	40	240		

Se requiere determinar el grado de control de calidad de este hormigón, si cumple o no con las especificaciones del CCCSR-1400 y las conclusiones sobre su variabilidad.

Calculemos las Variables estadísticas:

Media aritmética de todas las muestras:

$$\overline{X} = \frac{\sum f'ci}{N} = 248,86 \text{ kgf/cm}^2$$

Desviación típica de los muestras:

$$\sigma_{n-1}{}^{*} = \sqrt{\frac{\sum(f'_{ci}-\overline{X})^2}{n-1}} = 22.91 \text{ kgf/cm}^2$$

Coeficiente de Variación: $V = \frac{\sigma_{n-1}}{\overline{X}} \times 100 = 9.21\%$

Con estos tres datos estadísticos podemos concluir que la variabilidad del hormigón producido es excelente, $\sigma_{n-1} <$ 25 kgf/cm² y V < 10%. Además la resistencia promedio está por encima de la resistencia especificada f'c = 210 kgf/cm². Por lo tanto podemos analizar la probabilidad de aceptación de este hormigón según el A.C.I. 214. La resistencia promedio que debía dar este hormigón para cumplir con los requisitos exigidos está dada por el mayor valor de las siguientes ecuaciones:

$$f'cr = f'c - 35 + 2{,}33\ \sigma_{n-1} = 210 - 35 + 2{,}33 \times 22.91 = 228 \text{kgf/cm}^2$$

$$f'cr = f'c + 1{,}34\ \sigma_{n-1} = 210 + 1{,}34 \times 22.91 = 241 \text{ kgf/cm}^2$$

Obtenemos entonces que este hormigón tiene un $\overline{X} > f'cr$ por lo tanto es aceptable en un 100%.

Si para este hormigón se especifica un f'c = 245 kgf/cm², la probabilidad de aceptación no sería ya del 100%; veamos:

* Se trabaja con σ_{n-1} para muestreo finito. En tecnología del hormigón nunca se trabaja con muestreos grandes; por lo que generalmente usamos el σ_{n-1}.

$\bar{f}'c = f'cr+35-2.33\ \sigma_{n-1} = 248.86+35-2.33 \times 22.91=234\ kgf/cm^2$

$f'c=f'cr-1,34 * \sigma_{n-1} = 248.86 - 1,34 \times 22.91 = 218\ kgf/cm^2$

Por lo tanto el $f'c = 218\ kgf/cm^2 < f'c = 245\ kgf/cm^2$, por lo tanto este hormigón no cumple la función de aceptación. Veamos ahora que probabilidad tiene de aceptarlo.

$Z = \frac{f'c - \bar{f}'c}{\sigma_{n-1}} = \frac{245 - 248.86}{22.91/\sqrt{3}} = -0.29$ de la tabla de la integración normal obtenemos para este A = - 0.29 una probabilidad de rechazar de 0.3859 (38.6%). Es decir se acepta para $f'c = 245\ kgf/cm^2$ en un 61%.

Análogamente, si el $f'c = 280\ kgf/cm^2$, tenemos:

$$f'c = 280 + 35 - 2,33\ \sigma_{n-1} = 261.62\ kgf/cm^2$$

$$f'c = 280 - 1.34\ \sigma_{n-1} = 249\ kgf/cm^2 \quad \text{(controla)}$$

$$Z = \frac{(280 - 248.86)}{22.91/\sqrt{3}} = -2,354$$

Probabilidad de rechazar = 0,9926 = 99%. En otras palabras este hormigón se rechaza en un 100%.

Finalmente podemos analizar la variabilidad de este hormigón,

calculando el histograma de frecuencias.

f'cmin = 195 kgf/cm² f'cmax = 290 kgf/cm² Rango = 290 - 195 = 95 kgf/cm²

Para hallar los intervalos de clase se puede utilizar una fórmula aproximada dada en los libros de estadística, que indica el número de intervalos de clase en función del número de datos así: K = 1 + 3.3 log (n) donde K = # de intervalos de clase y N = # de datos = K = 6,79 ≈ 7.0; tomemos siete intervalos de clase = 95/7 = 13.57 ≈ 14

INTERVALO I	FRECUENCIA ABSOLUTA fa	FRECUENCIA RELATIVA fr	fr/L
195 - 209	3	0.0526	0.0037
210 - 224	5	0.0877	0.0063
225 - 239	7	0.1228	0.0088
240 - 254	13	0.2281	0.0163
255 - 269	18	0.3158	0.0225
270 - 284	9	0.1579	0.0113
285 - 299	2	0.0351	0.0025

donde L = Longitud del Intervalo = 14

Calculemos los valores de la distribución normal con $\overline{X}$ = 248.86 kgf/cm² y σ_{n-1} = 21,21 kgf/cm²

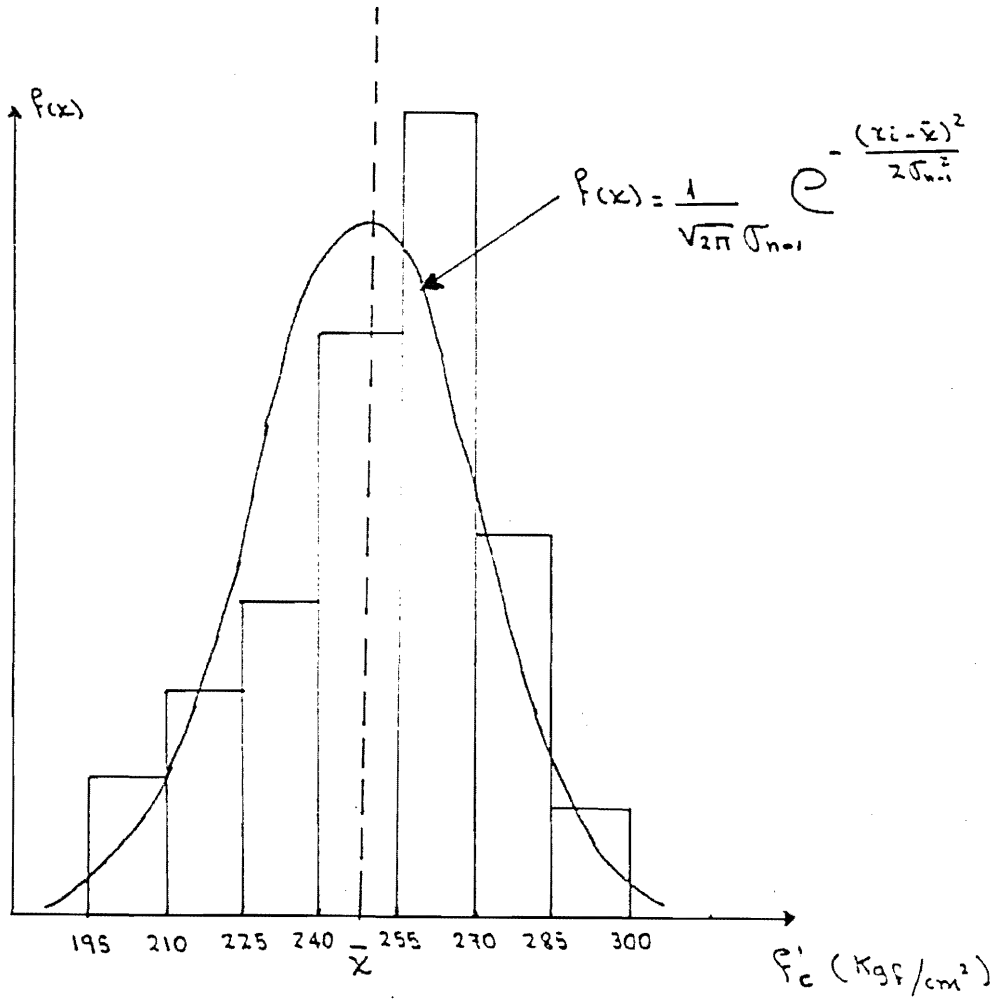
X	f(x)
195	0.0007
210	0.0035
225	0.0100
240	0.0172
255	0.0180
270	0.0114
285	0.0044

Veamos como queda la gráfica: (Página siguiente)

En conclusión el histograma de frecuencias nos indica que la distribución no es simétrica con respecto al promedio, lo que han podido confirmar varios investigadores que han trabajado en control de calidad del hormigón, se puede por lo tanto, proceder a utilizar otra distribución tal como la log-normal y modificar los resultados de control de calidad sin embargo este tema está lejos del alcance nuestro por lo que seguiremos utilizando la distribución normal, en todos los cálculos.

1.4.4 EJemplo de Control de Calidad Interno:

En una instación de producción de hormigón se tomó una muestra de hormigón y se fabricaron con ella 12 cilindros, se fallaron luego a 28 días y los resultados fueron:



Histograma de frecuencias y Curva de distribucion normal

para el ejemplo propuesto.

CILINDRO No.	f'c (kgf/cm²)
1	234
2	243
3	241
4	255
5	215
6	243
7	248
8	218
9	224
10	230
11	230
12	229

Efectuar la evaluación estadística de este muestreo.

Calculemos la desviación típica de la muestra:

$$\sigma = \frac{1}{d_2} (f'cmax - f'cmín)$$

Donde: d_2 = Factor dado por el A.C.I. que depende del número de muestras.

No. Muestras	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
d_2	1.128	1.693	2.059	2.326	2.534	2.704	2.847	2.970	3.078	3.173	3.258

$$\sigma = \frac{1}{3.258} \times (255 - 215) = \frac{40}{3.258} = 12,27 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\overline{X} = \frac{\sum f'ci}{n} = 234,17 \text{ kgf/cm}^2$$

$$V: \text{ coef. de Variación} = \frac{12,27}{234,17} \times 100 = 5,23\%$$

Esto nos indica que el valor promedio para esta muestra es de 234 kgf/cm^2 con un pobre control de calidad, ya que $V > 5\%$. (Ver tabla A.C.I.).

1.5 ENSAYOS SOBRE EL HORMIGON ENDURECIDO[10]

Control de Calidad en la obra

1.5.1 Introducción: Como acabamos de explicar en el numeral anterior, normalmente los métodos aceptados para evaluar la calidad del hormigón en las estructuras consiste en ensayar probetas estándar fabricadas con el hormigón que realmente se está colocando en la estructura y curados en condiciones adecuadas de humedad y temperatura. Sin embargo este método tiene ciertas ventajas como son: El retraso para obtener resultados de las pruebas, la posibilidad de que las muestras ensayadas no sean representativas del hormigón colocado, la necesidad de probar las muestras hasta la falla, la dificultad para reproducir los resultados de la prueba y el alto costo de los ensayos; todas estas causas y otras más fueron el origen del nacimiento de diferentes pruebas rápidas y económicas del hormigón en las estructuras. Estos métodos por lo general miden otra propiedad del hormigón que se puede relacionar con la resistencia, entre ellas tenemos: La dureza, la resistencia a la penetración, el rebote elásti-

co, pruebas de ultrasonido, rayos X, la madurez, etc.

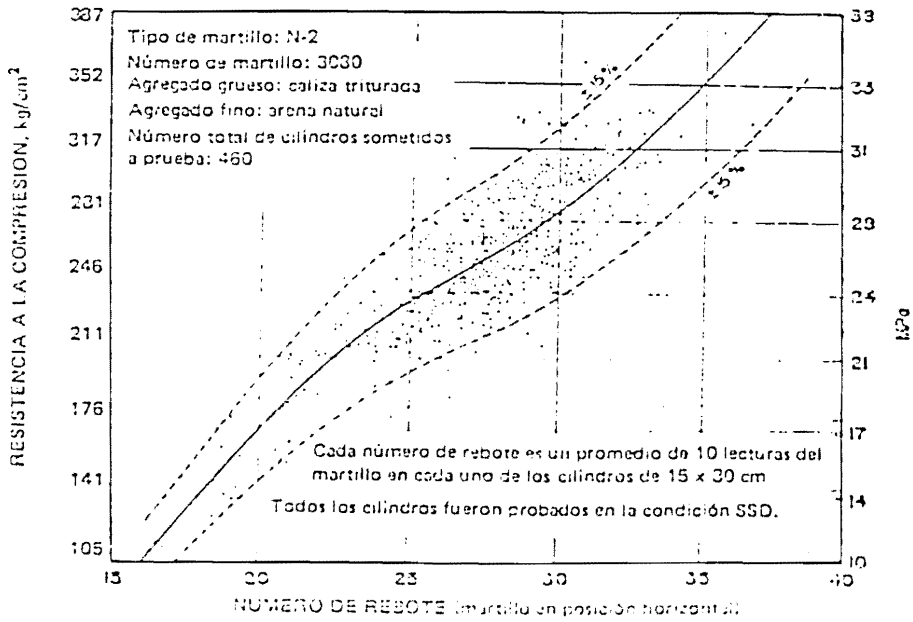
Aúnque la ejecución de éstas pruebas es relativamente fácil el análisis y la interpretación de los resultados no lo son, ya que el hormigón es un material complejo; por lo tanto, se recomienda a los ingenieros que la interpretación de los resultados siempre debe hacerla un especialista y no los técnicos que llevan a cabo las pruebas. Veamos en el siguiente cuadro un resumen de estas medidas.

1.5.2 Procedimientos para estimar la calidad de un hormigón en una estructura

METODO	NORMA	Variables que se determinan
Análisis Químico	ASTM C85 y C856	Composición del hormigón Relación A/C.
Extracción de Núcleos	ASTM C42	Resistencia, Peso específico, Porosidad.
Esclerómetro	ASTM C805 y C803	Resistencia
ULtrasonido	ASTM C597	Resistencia y fisuras
Rayos X	----	Posición del refuerzo
Microscopio	ASTM C457	Fisuras
Ensayos de Carga	----	Comportamiento elástico de la estructura

1.5.3 Relaciones experimentales entre los diferentes métodos de medida de la resistencia del hormigón en una estructura y el f'c.

1.5.3.1 Número de Rebote: Este método se encuentra normalizado en el A.S.T.M. C-805. Se fundamenta en el principio del choque elástico*. Experimentalmente se ha comprobado que existe una relación entre la resistencia del hormigón y el número de rebote. Las relaciones son del siguiente tipo:



* El equipo se conoce comercialmente con el nombre de martillo Schmidt.

Ejemplo: en un ensayo con un esclerómetro de rebote se obtuvieron los siguientes resultados:

No. Golpe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. Rebote	30	32	28	30	32	34	33	31	30	29

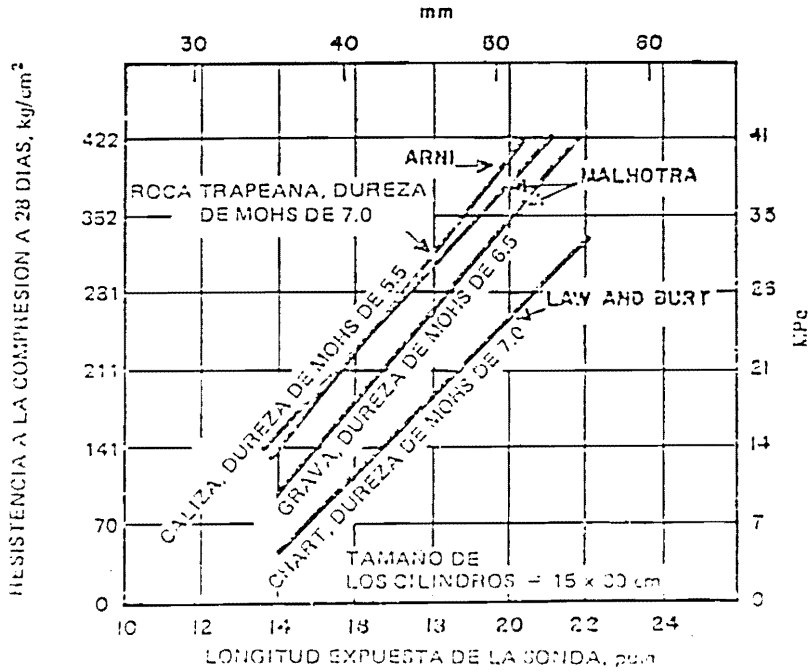
hallar la resistencia probable de este hormigón?

$\overline{NR}$: Número de rebote promedio = 30.90

De la gráfica obtenemos para este $\overline{NR}$ un $\overline{f}'c$ = 281 kgf/cm², y con un 85% de confianza el valor de la resistencia oscila entre 246 kgf/cm² y 330 kgf/cm².

1.5.3.2 Resistencia a la penetración: Este método se encuentra normalizado en el A.S.T.M. C-803. Consiste en determinar la profundidad de penetración de un perno de acero en el hormigón utilizando un dispositivo estándar conocido como la pistola Windsor. Las relaciones obtenidas tienen la siguiente forma: (Ver página siguiente)

1.5.3.3 Extracción de núcleos: Puede decirse que este método, cuando se realiza con sumo cuidado, es el único procedimiento que puede considerarse como patrón para los otros métodos. Si los resultados de las exploraciones esclerométricas, ultrasonido, gammagrafía, rotura de probetas enmol-



dadas, no satisfacen plenamente las especificaciones exigidas, no hay otra solución que taladrar el hormigón, para extraer núcleos testigos del hormigón realmente colocado. El método utilizado y los procedimientos recomendados aparecen en la norma A.S.T.M. C-42. Normalmente la resistencia del núcleo da un 10-20% por debajo de la de los cilindros tomados durante el control de calidad.

CAPITULO II

ADITIVOS QUIMICOS PARA EL HORMIGON

(Comité A.C.I. 212. Norma A.S.T.M. C-494)

2.1 INTRODUCCION

Los aditivos son productos químicos, naturales o artificiales, que adicionados al hormigón en cantidades inferiores al 5% del peso del cemento producen modificaciones en las características físicas y mecánicas del hormigón. Aquí nos vamos a referir sólo a los aditivos que se mezclan con los constituyentes básicos del hormigón: cemento, agua y agregados. (Experimentalmente se ha comprobado que el buen desempeño del hormigón a mediano y largo plazo se debe a los siguientes factores: (a) Al diseño de la mezcla, Selección de materiales adecuados, relación agua-cemento, calidad del cemento, entre otras y (b) A la adecuada compactación del hormigón en las formaletas. Es por ello que para fabricar un hormigón de calidad adecuada se debe optimizar el cumplimiento de las características del material, tanto en la etapa inicial (hormigón fresco), como en la final (hormigón en-

durecido); y uno de los métodos de optimización es la adecuada utilización de los aditivos de tal forma que se logren buenos resultados en ambas etapas.)

2.2 DEFINICION DE ADITIVOS:

Según la Norma A.S.T.M. C-125 "Definiciones de los términos relativos al hormigón y sus componentes"; un aditivo es un material diferente al agua, agregados y cemento, que se emplea como componente activo del hormigón o mortero y que se adiciona a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado". Son excepciones a esta definición aquellos aditivos que al adicionarse a la mezcla producen un tipo especial de hormigón, como por ejemplo: hormigón celular, aislante, reforzado con fibras, impregnado con polímeros, polimerizado, expansivo, epóxi, latex, etc.

2.3 HISTORIA:

Se ha podido comprobar que en la época antigua, principalmente en la tecnología romana ya se utilizaban aditivos a las mezclas de cal, puzolana, arenas y piedras. Estos aditivos fueron la sangre (hemoglobina) y la clara de huevo. Pero modernamente el desarrollo más importante, en la tecnología de los aditivos fué el descubrimiento del cemento Portland en 1824. El primer aditivo usado para modificar las propie-

dades del cemento fué el Sulfato de Calcio (yeso).

En los inicios del presente siglo, se ensayó el uso de silicatos sódicos y diversos jabones para mejorar la impermeabilidad. Desde 1905 se emplearon los fluosilicatos como endurecedores de piso.

La comercialización de los aditivos se inició en 1910, con hidrófugos, acelerantes del fraguado, hidrófugos-aceleradores del fraguado. En 1935 se comercializaron los plastificantes y más tarde los retardantes. Los anticongelantes aparecieron en 1955. Los inclusores de aire en 1939, finalmente en 1942 la A.S.T.M. publicó normas provisionales para los cementos con aire incluido. Actualmente la A.S.T.M. define las siguientes normas de ensayo de aditivos:

A.S.T.M. C-260	Especificaciones para aditivos inclusores de aire
A.S.T.M. C-494	Aditivos Químicos para hormigón
A.S.T.M. C-618	Aditivos Químicos finamente divididos para hormigones de cemento Portland

Nosotros nos vamos a centrar en la norma A.S.T.M. C-494.

2.4. IMPORTANCIA EN EL USO DE LOS ADITIVOS

2.4.1 Modificación de las características del hormigón fresco:

Aumento de la trabajabilidad, disminución del contenido de agua para igual trabajabilidad, retardar o acelerar el tiempo de fraguado, controlar la exudación, disminuir la segregación, mejorar la bombeabilidad. Reducir la perdida de asentamiento con el tiempo.

2.4.2 Modificación de las características en estado endurecido: Retardar o reducir el calor de hidratación, acelerar la ganancia de resistencia con el tiempo, aumentar la resistencia a compresión, flexión y tracción, aumentar la durabilidad, mejorar la impermeabilidad, reducir las reacciones alcali-agregado, aumentar la adherencia hormigón acero, mejorar la resistencia al impacto y a la absorción, impedir la corrosión del acero de refuerzo del hormigón.

2.5 PREPARACION Y ALMACENAMIENTO

El éxito obtenido al utilizar los aditivos depende en gran medida de la aplicación de un método apropiado de preparación y dosificación. La preparación comprende la fabricación de soluciones estándar o su dilución para facilitar su adecuada dosificación. Los aditivos líquidos suelen tener concentraciones elevadas por lo que se recomienda antes de su uso agitación continua. Es recomendable también almacenar los aditivos a temperatura ambiente y en los envases suministrados por el fabricante. El tiempo máximo de almacenamiento en

buenas condiciones, es por lo general 2 años.

2.6 DOSIFICACION DE LOS ADITIVOS:

Usualmente la dosificación se da como un porcentaje del peso del cemento, según la proporción indicada, tal porcentaje oscila entre 0.2% y 4%, según el tipo de aditivos. La adición de los aditivos a la mezcla comprende no sólo la cantidad utilizada, sino la velocidad de descarga y el momento de la adición. Alterar el tiempo en que se agregue el aditivo durante el ciclo de mezclado puede en algunas ocasiones, variar la efectividad del mismo. Se ha observado por ejemplo que el tiempo de retardo de un aditivo retardante depende del momento en que el aditivo se agregue a la mezcla. Debe controlarse además la distribución del aditivo en todo el volumen de hormigón para garantizar una correcta homogeneidad. Si dos aditivos se van a utilizar en una misma mezcla se debe consultar previamente con el fabricante las posibles alteraciones que puedan ocurrir a las propiedades del hormigón.

2.7 CLASIFICACION DE LOS ADITIVOS:

Cada aditivo se caracteriza de acuerdo a la modificación o modificaciones más importantes que producen en el hormigón; teniendo en cuenta que ellos a su vez cumplen funciones

secundarias. El empleo de un aditivo determinado, puede producir modificaciones inevitables de ciertas propiedades de los hormigones que no se requieren como función primaria del aditivo. La clasificación más utilizada por nosotros es la que da la norma A.S.T.M. C-494 "Especificaciones de aditivos químicos para el hormigón", que es la siguiente:

TIPO	DESCRIPCION
A	Reductores de agua o Plastificantes
B	Retardantes del fraguado
C	Acelerantes del fraguado y la Resistencia
D	Reductores de agua y Retardantes
E	Reductores de agua y acelerantes
F	Super Reductores de Agua o Superplastificantes o Fluidificantes.
G	Super Reductores de Agua y Retardantes

Veamos una explicación de cada uno:

2.7.1 Reductores de Agua: Son generalmente compuestos orgánicos o mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos, utilizados para reducir los requisitos de agua de la mezcla a trabajabilidad constante o para plastificar la mezcla de hormigón si se mantiene constante la relación agua-cemento. Los principales representantes de este grupo son los "lignosulfonatos". En general estos aditivos reducen el agua de la mezcla hasta en un 12%; esto causa una disminución en la relación agua-cemento del hormigón y por ende se pueden lograr

mayores resistencias. Experimentalmente hemos encontrado aumentos de resistencia hasta de un 25% respecto a la mezcla sin aditivo, en varios trabajos dirigidos de grado, utilizando varias marcas de aditivos locales[20]. Un efecto secundario con éstos aditivos es la rápida pérdida de asentamiento con el tiempo, en comparación con la mezcla sin aditivo. Se ha comprobado que el efecto de un aditivo tipo A varía según la relación agua-cemento del hormigón; no se recomienda usar éstos aditivos en hormigones con altas relaciones A/C (>0.60), ni en cementos que tengan altas dosis de C_3A y álcalis[20].

2.7.2 Retardantes: Son generalmente sustancias orgánicas pertenencientes a las siguientes categorías: los lignosulfonatos (de Calcio, Sodio, de Amonio); los Hidratos de Carbono, Acidos Fosfóricos, Glicerina, Boraz, etc. con estos aditivos se logra un retardo adecuado en el tiempo de fraguado del hormigón con una leve mejoría de la resistencia a los 28 días. El retardo del tiempo de fraguado depende de la dósis de aditivo; éste debe ser tal que produzca un retardo de por lo menos 1 hora en el fraguado inicial pero no mayor de 3 horas. Para el fraguado final el retardo debe ser menor de tres horas y media, con respecto a la mezcla patrón.

Los retardantes se usan cuando el hormigón se va a colocar en zonas de elevadas temperaturas, para el transporte desde plantas productoras de hormigón a las obras, para evitar juntas de cons-

trucción, en trabajos de inyección de hormigón, etc. Debe tenerse en cuenta que el aditivo retardante reduce la resistencia las primeras horas, pero éste efecto desaparece a los 2 ó 3 días.

2.7.3 Acelerantes: En este grupo de aditivos se clasifican una amplia variedad de compuestos químicos que tienen como finalidad acelerar el endurecimiento del hormigón (ganancia de resistencia con el tiempo). Entre otros están: los cloruros de Calcio, Sodio, Aluminio, Hierro. Las bases Alcalinas, los Carbonatos, Silicatos, Aluminatos, etc. Con éstos aditivos se logra reducir el tiempo de fraguado inicial y final. Se incrementa la resistencia los primeros días, sin modificación a edades posteriores. Su uso está controlado según los problemas a solucionar en la obra como: desencofrado rápido, en clima frío, prefabricaciones, reparaciones, etc. Su uso está limitado en hormigones pretensados si el acelerante tiene cloruros que afecten el acero de refuerzo.

2.7.4 Reductores de agua y Retardantes: Estos aditivos producen efectos similares a los del tipo A, pero con la ventaja de no perder rápidamente el asentamiento. Son productos tensoactivos de carácter aniónico (jabones de resinas, lignosulfonatos sódicos, sulfonatos de alkilarilo, sales de hidrocarburo sulfonado), o productos tensoacticos no iónicos, ácidos fosfóricos, glicerina, etc. Estos aditivos aumentan la

trabajabilidad, disminuyen el contenido de agua, aumentan los tiempos de fraguado. Se usan en hormigones fuertemente reforzados, en hormigón premezclado, y en hormigón bombeado.

2.7.5 Reductores de agua y Acelerantes: Estos aditivos son útiles cuando se requiere aumentar la plasticidad de la mezcla y obtener una rápida resistencia. Sus productos base son: Acidos lignosulfonatos y sus sales, ácidos carboxílicos, sales de Zinc, boratos fosfatos y cloruros. Con éstos aditivos se puede acelerar la corrosión del acero de refuerzo, además no se deben usar en hormigones que vayan a estar en contacto con Magnesio y Aluminio, o en hormigones resistentes a sulfatos.

2.7.6 Super reductores de agua: Con éstos aditivos se logran mayores efectos que con los del tipo A, ya que permiten un alto poder dispersante de las partículas de cemento en el hormigón. Se puede usar básicamente cuando se requiera una alta fluidez de la mezcla (autonivelante), alta resistencia a corto y largo plazo, y economía de cemento. Sus productos base son sales de ácido Naftensulfónico o melanina y resinas sintéticas. Las aplicaciones prácticas más importantes son: en hormigón transportado por bombeo, en hormigones de alta resistencia (disminuyen el agua en más del 25%), en zonas estructurales densamente reforzadas. El efecto superplástificante solo dura de 30 a 40 minutos, por lo que se recomienda

adicionarlo en la obra.

2.7.7 Super-reductores de agua y Retardantes: Son aditivos con propiedades similares al anterior pero con la ventaja de permitir mayores períodos de tiempo para el manejo de mezcla. Son generalmente sales de ácido Naftensulfónico o Melanina, Resinas Sintéticas y productos retardantes del fraguado (Aditivos Tipo B). Las principales aplicaciones son: Bombeo del hormigón, estructuras muy reforzadas, hormigón autonivelante, con este aditivo se logran altas resistencias inicial y final. Además no es necesario su dosificación en obra, a no ser que experimentalmente se compruebe lo contrario.

2.8 OTROS TIPOS DE ADITIVOS

La tecnología de los aditivos para el hormigón es tan amplia que actualmente es difícil conocer toda la variedad de materiales químicos disponibles en el mercado para su uso en elementos estructurales de hormigón. Entre otros merecen especial atención los siguientes:

2.8.1 Aditivos Expansores: Son aquellos aditivos que producen expansiones volumétricas en el hormigón. El más común es el hierro granulado.

2.8.2 Aditivos Adherentes: Se usan para reparaciones estructurales, son generalmente emulsiones poliméricas.

2.8.3 Aditivos para reducir la permeabilidad: Estos aditivos son aquellos que disminuyen la tasa de transmisión de agua a través del hormigón. Son generalmente jabones, Estearato de Butilio, y ciertos derivados del petróleo.

2.8.4 Aditivos inclusores de aire: Se requieren para mejorar la durabilidad del hormigón ante el fenómeno del congelamiento y deshielo. Además mejoran la trabajabilidad de la mezcla. Por lo general reducen la resistencia del hormigón.

2.8.5 Aditivos generadores de gas: Estos aditivos generan burbujas de gas en el hormigón fresco, para contrarrestar la disminución de volumen del hormigón y la exudación, originando por lo tanto un hormigón con el mismo volumen original con el que fué colocado. Son por ejemplo: Peróxido de Hidrógeno, Aluminio Metálico y ciertas formas de carbón activado.

2.8.6 Aditivos para Rellenos: Se usan para hormigones en pozos petroleros, con altas temperaturas y grandes distancias de bombeo. Son por ejemplo: arcillas bentoníticas, barita, gomas naturales.

2.8.7 Aditivos Colorantes: Existen además Fluoculantes,

insecticidas, germinicidas y fungicidas.

2.9 ENSAYOS CON ADITIVOS

Las normas internacionales recomiendan los siguientes ensayos:

- Ensayo de Asentamiento pérdidas de asentamiento con el tiempo A.S.T.M. C-143
- Ensayo de Peso Unitario y % aire del hormigón A.S.T.M. C-138
- Ensayo de fraguado del hormigón. A.S.T.M. C-403
- Ensayo de resistencia a la compresión. A.S.T.M. C-39
- Ensayo de resistencia a la Flexotracción. A.S.T.M. C-78
- Ensayo de Contracción. A.S.T.M. C-157
- Ensayo de durabilidad. A.S.T.M. C-666

2.10 RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS:

Materiales utilizados en las Mezclas:

- Cemento: Portland Tipo I Rioclaro

- Agregado fino: Procopal
- Agregado grueso: Procopal
- Agua potable

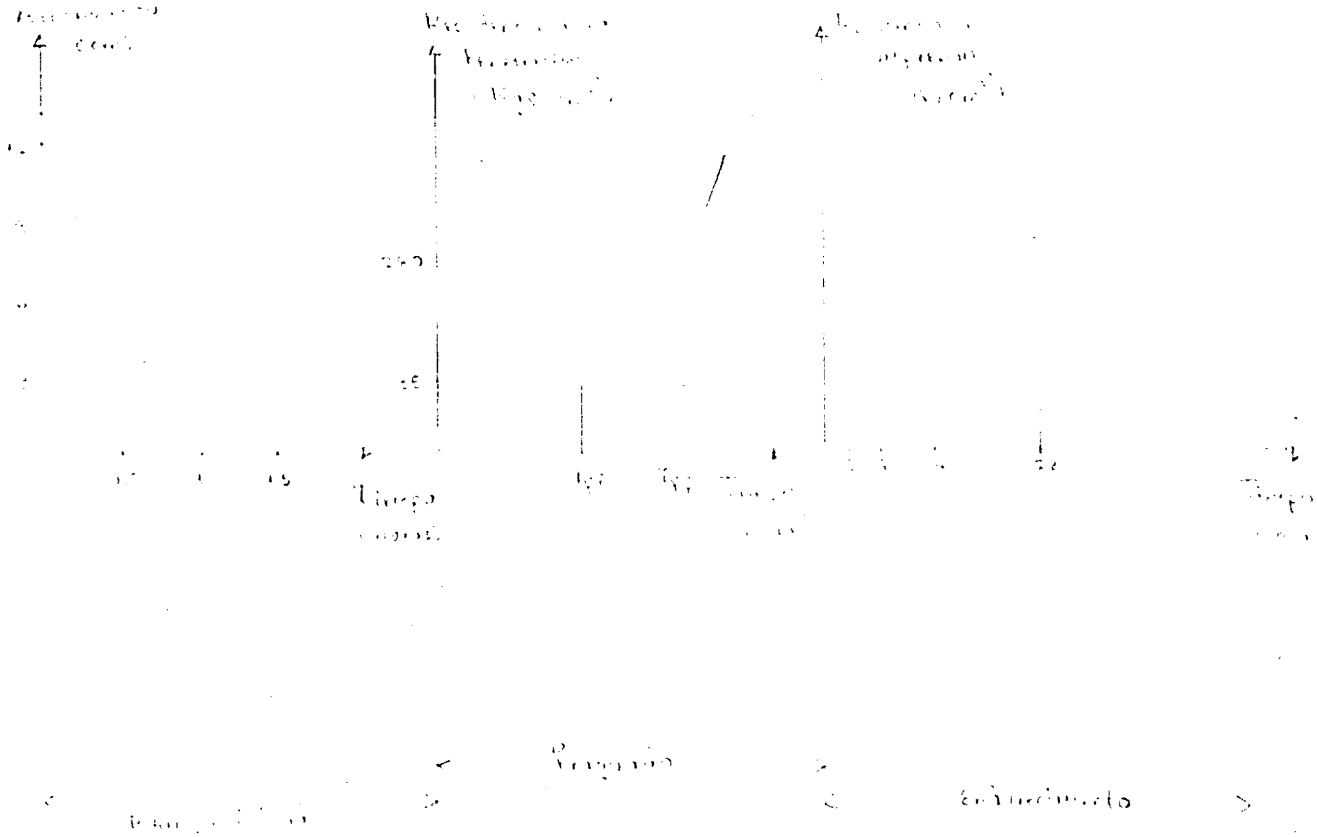
Diseño de mezcla patrón:	0,46, 1: 2,33: 2,16
Asentamiento obtenido:	5.0 cm
Peso unitario:	2433 kg/m^3
% aire, método volumétrico:	2.0%
Resistencia a la compresión promedio:	230 kgf/cm^2

2.10 ESPECIFICACIONES SEGUN NORMA A.S.T.M. C-494

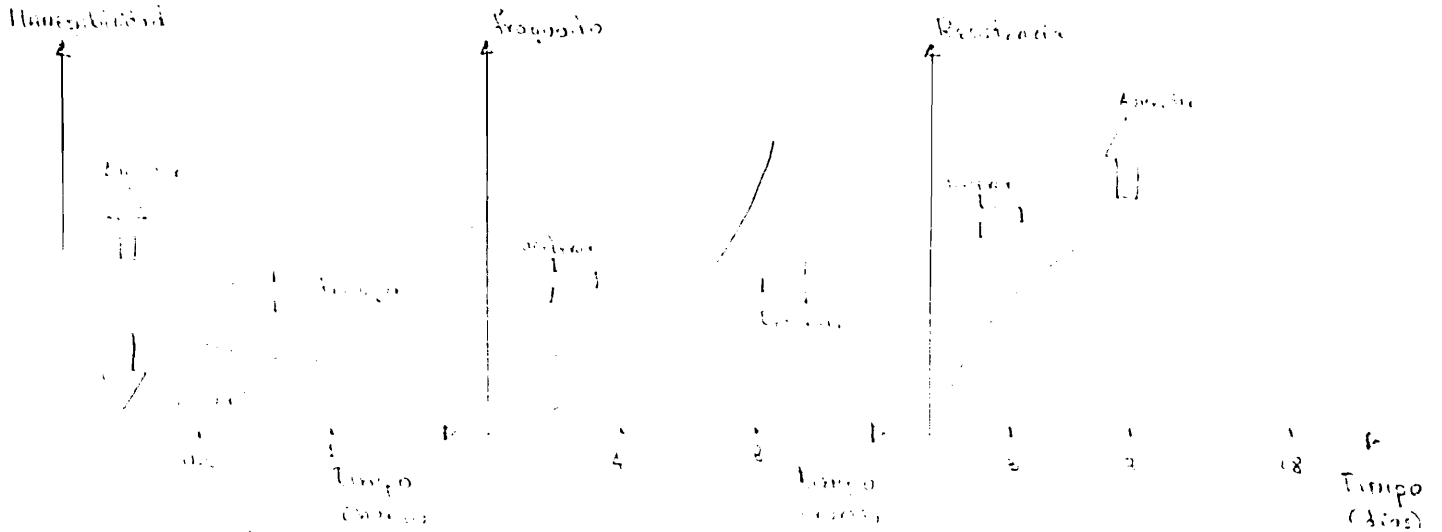
Tanto los requisitos físicos como mecánicos en los hormigones fabricados con los aditivos dados en la norma, deben cumplir los siguientes valores: (Ver Tabla siguiente).

PROPIEDAD	TIPO DE ADITIVO						
	A	B	C	D	E	F	G
1. Máx. % de agua respecto a la mezcla patrón	95	-	-	95	95	88	88
2. Desviación permisible para el tiempo de fraguado respecto a la mezcla patrón							
inicial: al menos	-	1h	1h	1h	1h	-	1
no más que	1h-1 1/2h	3 1/2h	3 1/2h	3 1/2h	3 1/2h	1h-1 1/2h	3 1/2
final: al menos	-	-	1h	-	1h	-	-
no más que	1h-1 1/2h	3 1/2h	-	3 1/2h	1h	1h-1 1/2h	3 1/2
3. Resistencia a la compresión. % mín. del patrón							
1 día	-	-	-	-	-	140	12
3 días	110	90	125	110	125	125	12
7 "	110	90	100	110	110	115	11
28 "	110	90	100	110	110	110	11
6 meses	100	90	90	100	100	100	10
1 año	100	90	90	100	100	100	10
4. Resistencia a la flexión % mín. del patrón.							
3 días	100	90	110	100	110	110	11
7 días	100	90	100	100	100	100	10
28 días	100	90	90	100	100	100	10

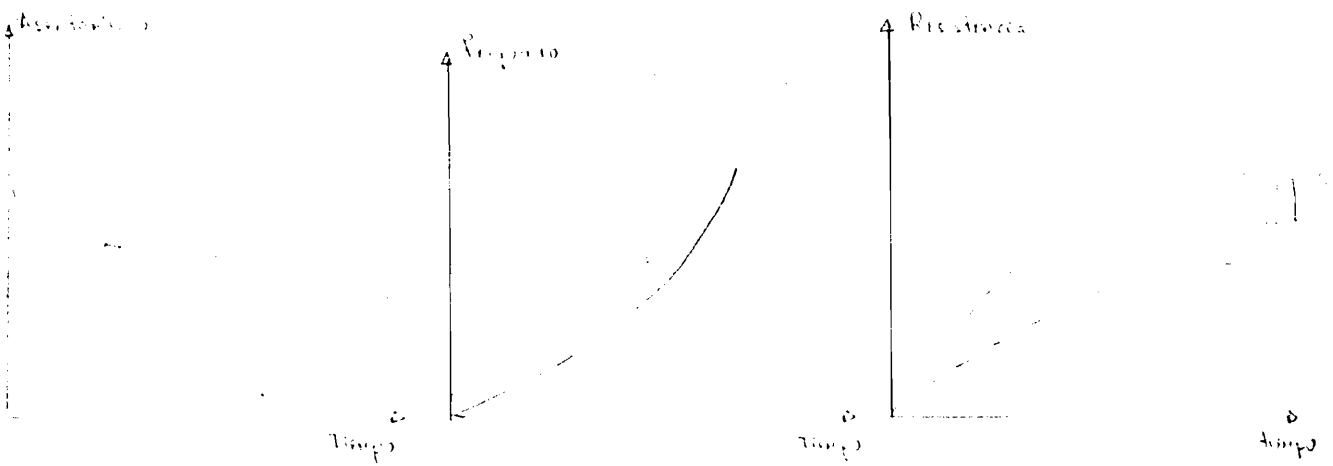
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGON FRESCO Y ENDURECIDO



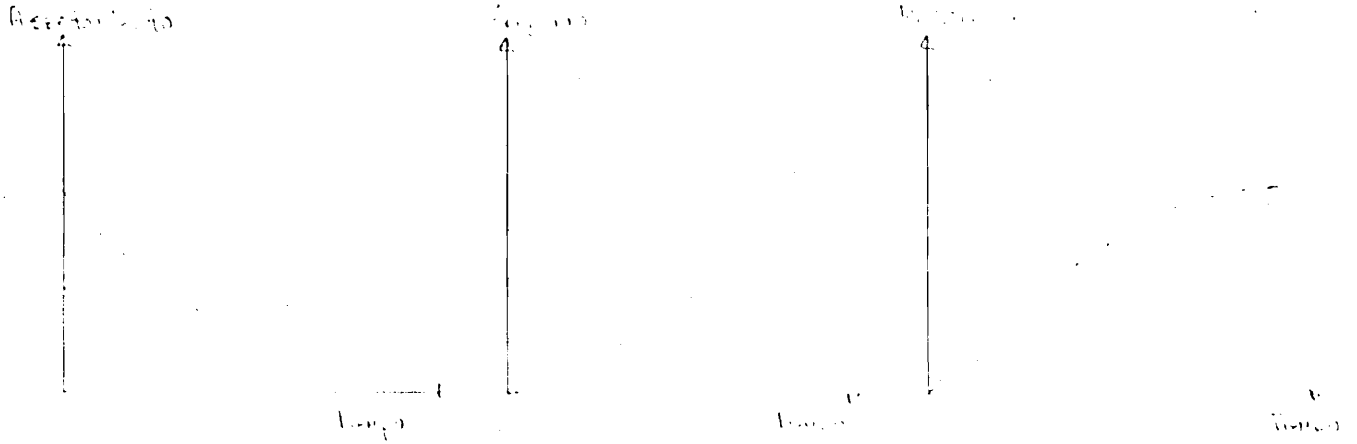
POSIBLES MODIFICACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGON



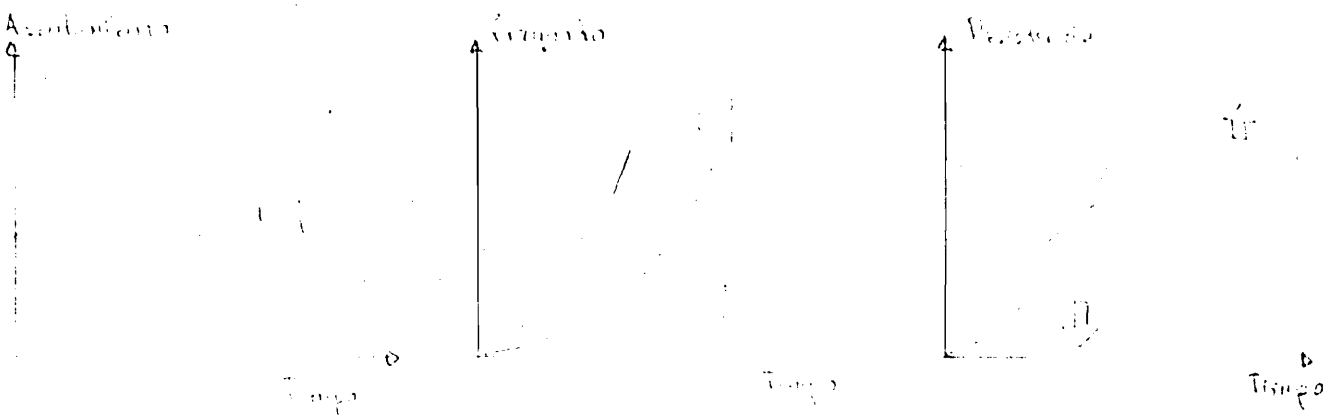
MODIFICACION DEL HORMIGON CON AUMENTO DEL CONTENIDO DE AGUA



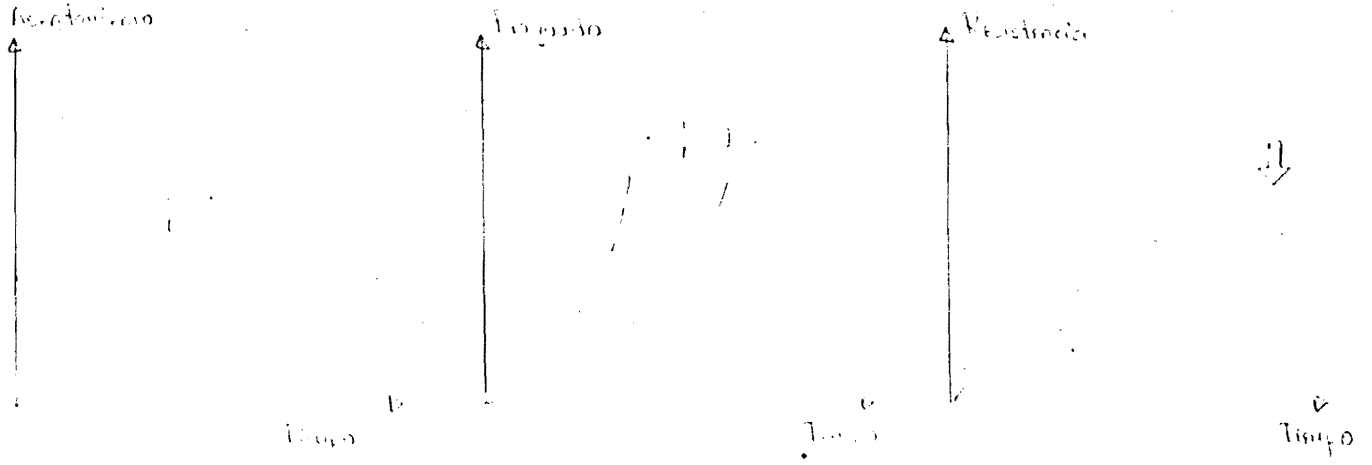
MODIFICACION DEL ASENTAMIENTO Y RESISTENCIA DEL HORMIGON CON ADITIVOS TIPO A



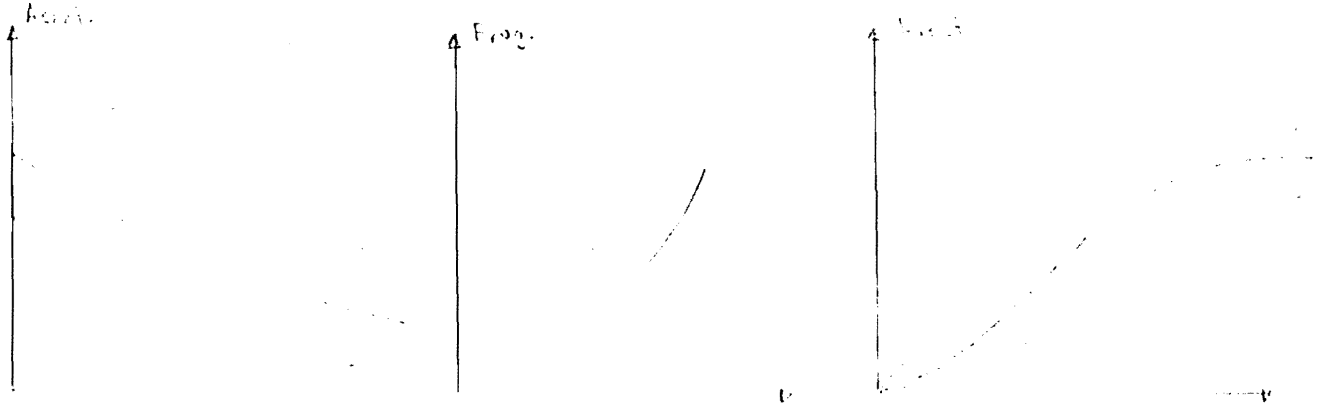
MODIFICACION DEL HORMIGON CON ADITIVOS TIPO B



MODIFICACION DEL HORMIGON CON ADITIVOS TIPO C.



EFECTO FLUIDIFICADOR DE UN ADITIVO TIPO F



ENSAYOS DE LABORATORIO

A.1 Diseño de la mezcla de hormigón

Se procedió a diseñar una mezcla de hormigón para un f'c = 210 kgf/cm² y σ_{n-1} = desconocido; utilizando materiales locales así:

Cemento: Rioclaro Portland tipo I

Arena: Procopal

Grava: Procopal de T.M. = 1 pulg.

Con el método propuesto por el A.C.I. 211.1 se encontró que las proporciones iniciales de la mezcla, por peso, eran:

Agua neta	Cemento	Arena seca	Grava seca
0,46	1	2,33	2,16

con esta mezcla se realizarán 5 muestreos y se midió el asentamiento y la resistencia a la compresión a cada uno.

A.2 Resultados

MUESTRA No.	ASENTAMIENTO (cm)	RESISTENCIA (kgf/cm²) por cilindro 1	2	3	4	5	6	7	8
1	10	218	225	226	199	246	241	237	-
2	5	241	235	226	230	210	250	-	-
3	5	191	240	230	240	234	231	-	-
4	5	234	243	241	255	215	243	248	218
5	5	224	231	230	229	-	-	-	-

Aplicando las especificaciones A.C.I.214 para cada muestreo analicemos los resultados internos, es decir para cada muestra:

MUESTRA	RANGO (kgf/cm²)	d_2	$\overline{X}$ (kgf/cm²)	σ_{n-1} (kgf/cm²)	V (%)	OBSERVACIONES
1	47,0	2,704	227,4	17,4	7,6	Control malo laborat
2	40,0	2,534	232,0	15,8	6,8	" " "
3	49,0	2,534	227,7	19,3	8,5	" " "
4	40,0	2,847	237,1	14,0	5,9	" " "
5	7,0	2,059	228,5	3,4	1,5	Cont. excelent. lab.

Ahora analicemos los resultados totales. Vamos a realizar los cálculos respectivos a manera ilustrativa, pero teniendo en cuenta que según las especificaciones del A.S.T.M. 214 se deben tener como mínimo 15 muestras. (Aquí sólo tenemos 5 resultados).

PROMEDIO TOTAL	σ_{n-1}	OBSERVACIONES
230,54 kgf/cm²	4,10 kgf/cm²	Control total excelente

A.3 Ensayos con aditivos

Con el hormigón diseñado previamente se prepararon mezclas

con cada uno de los 7 tipos de aditivos químicos dados en la norma A.S.T.M. C-494. Se utilizó una misma fábrica: Sika Andina. Las dosificaciones se escogieron según las recomendaciones del fabricante. Los resultados fueron:

TIPO ADITIVO	NORMA COMERCIAL	DOSIFICAC. %	ASENTAM cm	$\overline{f}'c$ kgf/cm²	V%
A	Plastiment V.B. 40	0.4	5	240	3.0
B	" V.Z.	0.4	8	261	8.1
C	Sikacrete	2.0	9	269	1.3
D	Plastocrete 161.R	0.4	>15	221	4.3
E	Plastocrete 169 H.E.	3.0	> 15	255	5.1
F	Sikament	1.0	> 15	201	2.9
G	Sikament 320	1.0	> 15	203	4.1

REFERENCIAS

1. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. " A Brief history of lime, cement, concrete and reinforced concrete". Special publication No.52. 1974.

2. R. FERET. "Etudes sur la constitution intime des Mortier hydráuliques". Bulletin de la societé d'Encouragement pour L'industrie Nationale. Vol. 96. 1897.

3. D.A. ABRAMS. "Design of Concrete Mi tures". Bulletin No.1 Structural Materials Research Laboratory. Lewis Institute. Chicago, 1918.

4. A.C.I. Bibliography No.2. "Evaluation of strength tests of concrete". Detroit, Michigan, 1960.

5. A.C.I. 214-77. "Recommended Practice for Evaluation of strength test Results of concrete". A.C.I. Manual of Concrete Practice. Part 1. 1986.

6. JOINT COMMITTEE C.E.B.-C.I.B.-F.I.P.-RILEM. "Principios recomendados para el control de calidad del hormigón y criterios para su aceptación y rechazo". Informes de la construcción del IETCC, Monografía No.325. 1975.

7. PRICE WALTER H. "Factors Influencing Concrete Strength". Journal of the American Concrete Institute. Feb. 1951.

8. A.S.T.M. STP 169A. "Sgnificance of tests and properties of concrete and concrete-Making Materials". April 1966. Baltimore.

9. CODIGO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIONES SISMO-RESISTENTES. Decreto Ley 1400 de 1984. Bogotá, Colombia.

10. MALHOTRA Y.M. "Nondestructire Methods for testing concrete". Monograph 875. Mines Branch Energy. Canadá, 1968.

11. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. (A.S.T.M.). Concrete and Mineral Aggregates" Vol. 04-02. 1983 Philadelphia.

12. GIRALDO BOLIVAR, Orlando. "Guía Práctica para el diseño de mezclas de hormigón, Universidad nacional de Colombia, 1987.

13. NEVILLE Adan. "Properties of Concrete". Ed. Pitman Publishing Ltda. Marshfield, Londres, 1985.

14. CARDONA J. Juan Carlos y LOPEZ A. Jorge Wilson. "Control de Calidad del hormigón con cilindros de 9x18cm". Universidad Nacional 1989. Trabajo Dirigido de Grado.

15. GARCIA M. Gabriel. "Control Estadístico de la calidad del hormigón". Universidad Nacional, 1982.

16. GOMEZ C. Gabriel. "Bondad de los criterios del A.C.I. para calificar la calidad de un hormigón". Revista Ingeniería e investigaciones, Vol. 3. No.2, 1985.

17. ANDERCOL S.A. "Manual de Aplicaciones de Aditivos para concreto". Preparado por los Ingenieros: Santiago Franco y George Hill.

18. SIKA ANDINA. "Manual técnico sobre uso de aditivos químicos para el concreto", 1990.

19. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committe No.212. "Guide for use of admixtures in Concrete". 1971, U.S.A.

20. GOMEZ Luis Guillermo y GARCIA Carlos Mario. "Proyecto de mezclas de hormigón con aditivos químicos". Trabajo Dirigido de Grado, Universidad Nacional, 1986.