

GUIA PRACTICA PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGON

Métodos

A.C.I. 211.1 Hormigón Normal

A.C.I. 211.1 Hormigón con Adiciones

Fuller Thompson

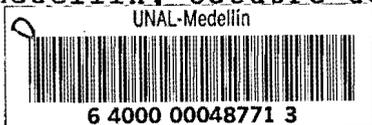
Bolomey

Faury

Trabajo para promoción a profesor asistente

Orlando Giraldo Bolívar
Ingeniero Civil

Medellín, octubre de 1987



20.136
47

Impresión y edición
1970

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento:

Al personal del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional, Seccional Medellín.

Al Doctor Gabriel García Moreno por su valioso aporte en la corrección del manuscrito.

A todas aquellas personas que colaboraron eficientemente en la elaboración del texto.



20707

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE FIGURAS	vii
PROLOGO	ix
1. Método A.C.I. 211.1 para hormigón normal	1
1.1 RESUMEN	1
1.2 ALCANCE Y METODOLOGIA	2
1.3 INTRODUCCION	2
1.4 PROPIEDADES DEL HORMIGON	7
1.4.1 Trabajabilidad	7
1.4.2 Resistencia	21
1.4.3 Durabilidad	37
1.4.4 Peso Unitario	42
1.4.5. Economía	44
1.5 INFORMACION PREVIA PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS	46
1.6 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGON	48
1.7 EJEMPLO DE DISEÑO	86
1.8 MEZCLAS PARA OBRAS PEQUEÑAS	97
1.9 PROGRAMA EN BASIC PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS (CASIO PB-700)	100
2. METODO A.C.I. 211.1 PARA HORMIGON CON ADICION DE CENIZAS VOLANTES	105
2.1 INTRODUCCION	109

	pág.
2.2 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LAS CENIZAS VOLANTES EN EL HORMIGON	106
2.3 PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGON CON CENIZAS VOLANTES Y EJEMPLO	114
2.4 ESPECIFICACIONES A.S.T.M. respecto al uso de las cenizas volantes en el hormigón	119
3. METODO FULLER-THOMPSON	123
3.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	123
3.2 EJEMPLO DE DISEÑO	131
4. METODO BOLOMEY	139
4.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	139
4.2 EJEMPLO	145
5. METODO FAURY	152
5.1 CONCEPTOS GENERALES	152
5.2 PROCEDIMIENTO	157
5.3 EJEMPLO	168
6. ENSAYOS DE CEMENTOS AGREGADOS Y HORMIGON	178
6.1 EL CEMENTO	178
6.2 AGREGADOS	180
6.3 HORMIGON	181
BIBLIOGRAFIA	184

LISTA DE TABLAS

TABLA	Pág.
1. Métodos de ensayo relacionados con la trabajabilidad del hormigón.	18
2. Relación entre algunos métodos de ensayo descritos en la Tabla 1.	20
3. Factores de modificación de σ_n para diferentes números de ensayos consecutivos.	28
4. Valores de f'_{cr} cuando se desconozca σ_n	28
5. Valores del coeficiente de variación para diferentes controles.	36
6. Relaciones A/C máximas por durabilidad	41
7. Valores de trabajabilidad recomendados para diferentes estructuras	49
8. Valores aproximados de agua y aire para el hormigón	54
9. Valores mínimos de contenido de cemento	63
10. Volúmenes de agregado grueso seco y compactado con varilla por volumen unitario de hormigón (A.C.I.)	65
11. Volúmenes de agregado grueso seco y compactado con varilla por volumen unitario de hormigón (Baladó)	66
12. Valores aproximados del peso unitario del hormigón	69
13. Proporciones del hormigón para obras pequeñas	98

TABLA

Pág.

14.	Especificaciones del cemento en algunas normas	113
15.	Contenido de agua y aire en hormigones con cenizas	116
16.	Selección de la consistencia del hormigón según la compactación	124
17.	Asentamientos para diferentes consistencias del hormigón	124
18.	Cantidad de agua en Kgf por metro cúbico de hormigón	125
19.	Corrección de tabla 18	125
20.	Curvas de Fuller para diferentes tamaños máximos	126
21.	Granulometrías de los agregados para el ejemplo	132
22.	Valores del coeficiente A en la ecuación de Bolomey	141
23.	Valores de B en la ecuación de Faury	158
24.	Valores de A en la ecuación de Faury	158
25.	Valores de K	159
26.	Valores de I_p para agregados	163

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Pág.
1. Metodología gráfica en el diseño de mezclas según A.C.I. 211.1	3
2. Curvas tensión-deformación para agregados, hormigón y pastas hidratadas (cemento+agua)	5
3. Curva que relaciona R_R y R_d para el hormigón	9
4. Equipo para ensayo de asentamiento	13
5. Medidor de penetración Kelly	15
6. Relación entre la penetración y el asentamiento	15
7. Medidor K en funcionamiento	16
8. Relación entre el índice de trabajabilidad y el asentamiento del hormigón	17
9. Diferentes probetas para ensayo de resistencia del hormigón	22
10. Procedimiento gráfico para la selección de las proporciones del hormigón según A.C.I. 318.83	30
11. Histograma de frecuencias de la resistencia del hormigón	32
12. Diagrama de flujo del control de calidad del hormigón en obra	38
13. Relación entre f'_{cr} , f'_c y σ_n según A.C.I. 318-83	57
14. Relación entre f'_{cr} y (A/C) en el hormigón	60
15. Volúmenes de agregado grueso seco y compactado con varilla por volumen unitario de hormigón	67

FIGURA	Pág.
16. Curvas de correlación entre la resistencia a la compresión del hormigón curado acelerado 24 h y la de 28 días curado normal	84
17. Curvas de correlación entre la resistencia a la compresión del hormigón a 7 días con 28 días de curado normal	85
18. Determinación gráfica de la (A/C) modificada	96
19. Comparación entre el desarrollo de resistencias de un hormigón normal y otro con cenizas	111
20. Gráfica de la ecuación (2 - 5)	112
21. Dosificación gráfica de agregados por Fuller	127
22. Gráfica del ejemplo Fuller	136
23. Dosificación gráfica de agregados por Bolomey	141
24. Gráfica ejemplo Bolomey	150
25. Gráfica de la ecuación de Faury	153
26. Gráfica para el cálculo del radio medio del encofrado	155
27. Ejemplo del cálculo del radio medio del encofrado	156
28. Dosificación gráfica de agregados según Faury	162
29. Valores de I_p	164
30. Valores de I_o para el hormigón de referencia	166
31. Gráfica de la sección más densamente armada en el ejemplo	169
32. Gráfica del ejemplo Faury	173

PROLOGO DEL AUTOR

Tratar de preparar unas notas, claras y prácticas que sirvan como ayuda docente y de consulta general para la ingeniería civil sobre el "diseño y control del hormigón", no fué tarea fácil y más aún cuando la literatura sobre el tema es muy amplia y dispersa. El siglo XX marca una nueva etapa en el conocimiento científico y técnico del material. Fué precisamente el ingeniero francés René Feret quien probablemente realizó el primer estudio racional sobre diseño de mezclas de hormigón entre los años 1892-1897 (Laboratorios de Ponts et Chaussées); a Feret le siguieron Abrams, Fuller, Weymouth, Thaulow, Walker, Goldbek, Gray, Talbot, etc. quienes cimentaron las bases para la moderna tecnología del hormigón.

Actualmente es el material más ampliamente utilizado en la construcción de un sin número de obras civiles (edificios, puentes, carreteras, centrales hidroeléctricas, plantas de tratamiento, tuberías, canales, etc.). Sin embargo sus innumerables propiedades lo hacen destacar como un material de construcción cuyo manejo y control requiere amplios cono-

cimientos de las matemáticas y la ingeniería. A pesar de lo anterior, y en muchas obras locales, los que fabrican y preparan el material siguen manteniendo unos hábitos y prácticas, procedentes más bien de la costumbre, donde se encuentran vicios y malas técnicas que deterioran la calidad final del hormigón.

Es importante resaltar que la aparente facilidad en la fabricación del hormigón es engañosa, muchas estructuras han fallado por causas inherentes a la calidad del material de construcción, es por esto por lo que un correcto diseño de la mezcla de hormigón, con los materiales a utilizar en la obra y con los márgenes razonables de seguridad, es imprescindible si se quiere lograr seguridad y funcionabilidad estructural. No se logra un proyecto excelente con un buen cálculo y diseño estructural si no se acompaña de prácticas correctas en el manejo y control de los materiales de construcción.

Esta guía práctica trata de llenar un vacío en el estudio del hormigón, describiendo algunos de los métodos más utilizados por la ingeniería en el diseño de las mezclas. La parte uno, se refiere principalmente al método empírico recomendado por el A.C.I.; este constituye el soporte teórico-práctico del libro. La parte dos, analiza tres métodos analíticos para trabajos especiales y la parte tres,

describe los métodos de ensayo de materiales.

Finalmente, vale la pena recordar la famosa frase del ingeniero Adam M. Neville al final de su libro "Properties of concrete"¹²: "Si el lector no puede diseñar una mezcla de hormigón satisfactoria, deberá considerar seriamente la posibilidad de construir en acero".

PARTE UNO

METODOS:

A.C.I. 211.1 Hormigón Normal

**A.C.I. 211.1 Hormigón con
adición de cenizas volantes**

I. METODO A.C.I. 211.1 HORMIGON NORMAL^{1*}

1.1 RESUMEN

Este método es el resultado de extensas investigaciones, en el campo del hormigón, de varias organizaciones Norteamericanas entre ellas: el A.C.I., P.C.A., U.S.B.R. Se fundamenta en los trabajos experimentales de Andrew Duff Abrams, Richart y Talbot, Goldbeck y Gray. Es un método empírico cuyos resultados han sido confirmados por una amplia información experimental. El procedimiento de diseño se puede realizar ya sea mezclando los materiales por volumen absoluto y luego calculando los pesos de cada uno de los componentes, o, directamente, calculando el peso del hormigón y deduciendo luego el peso de cada uno de los ingredientes, siempre para obtener un metro cúbico de hormigón. Ambas formas de cálculo de la mezcla tienen en cuenta todo lo relacionado con la facilidad de colocación, resistencia a la compresión o a la flexión, durabilidad y economía; además tiene una gran ventaja; se puede programar con facilidad para un rápido y práctico manejo del método¹.

* El superíndice indica el número de la referencia

1.2 Alcance y metodología

El campo de aplicación del método se limita a la fabricación de hormigones con dos agregados y con un peso unitario superior a 2.0 gf/cm^3 . Además se tienen en cuenta requisitos tales como la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad exigidas para cualquier mezcla de hormigón fabricado en el sitio (a diferencia del hormigón para piezas prefabricadas).

El proceso de diseño se basa en la utilización de la técnica de ensayo y error. Partiendo de unas proporciones iniciales obtenidas utilizando los resultados empíricos del método, vamos corrigiendo gradualmente la mezcla con pastones de prueba, hasta obtener las características deseadas para el hormigón definitivo.

En el gráfico No. 1 se resume la técnica, a seguir, en un diagrama de flujo.

1.3 Introducción

Prácticamente el comienzo de las técnicas modernas para el diseño de mezclas de hormigón fué a principios de este siglo (1900). Los trabajos de Feret, Fuller y Thompson, Abrams, Bolomey²¹, etc., marcaron una nueva etapa en la investigación y desarrollo del hormigón como material de cons-

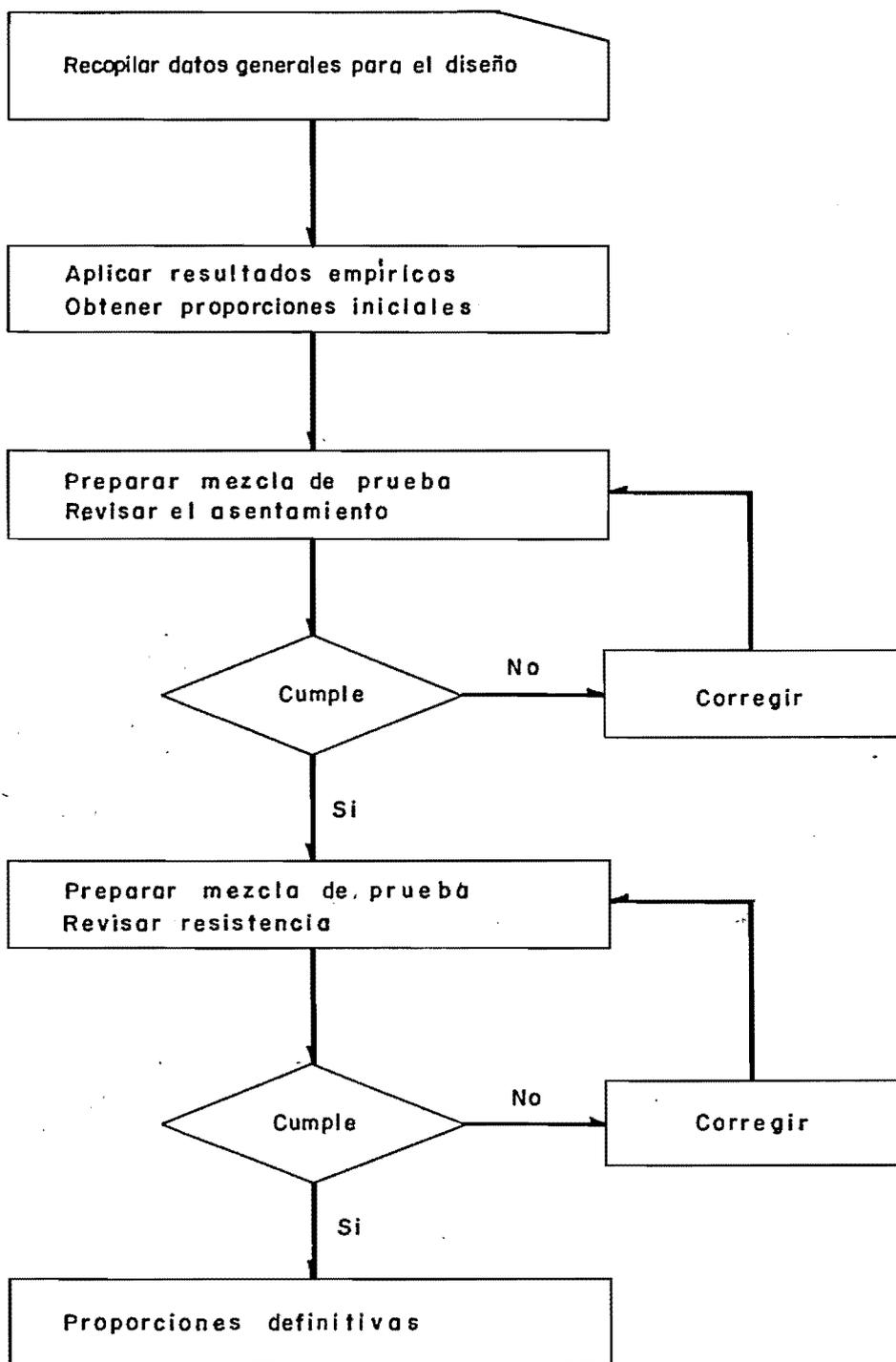


Figura 1 Metodología gráfica en el diseño de mezclas según ACI 211.1

trucción. Antes de 1900 sólo se utilizaban para la confección del hormigón, proporciones preestablecidas empíricamente (por ejemplo se especificaban mezclas 1:3 por volumen suelto para pavimentos, 1:5 para losas, 1:4 para vigas y columnas, etc.)³¹. Esto era permitido para esa época ya que la calidad del hormigón era poco controlada. Pero para la mayoría de las aplicaciones, que tiene hoy en día el hormigón, es indispensable si no obligatorio, utilizar un procedimiento correcto de diseño de mezclas para cumplir las rigurosas especificaciones que se le exigen al material en la construcción.

El hormigón es un material heterogéneo, compuesto por una parte cementante (cemento + agua) y otra, que podemos considerar de relleno (los agregados), pero que mejoran notablemente las características del material. Recién preparado tiene un aspecto de fluido viscoso, propiedad que le permite moverse con facilidad rellenando completamente las formaletas de las estructuras. Una vez se pasa esta primera etapa de material moldeable, con el tiempo y bajo condiciones de exposición aceptables (temperatura y humedad), el material se convierte en un sólido capaz de mantener su forma y soportar cargas externas con un comportamiento que se puede considerar, aproximadamente, elasto-plástico. (En forma exacta el hormigón ni es elástico ni es plástico*, su

* Es un fluido viscoso-elasto-plástico; sus características se estudian mejor en la reología. Es un cuerpo "reológico" ya que sus propiedades varían con la variable tiempo.

curva tensión-deformación $\sigma - \epsilon$, muestra un comportamiento aproximadamente lineal hasta el 40% de su resistencia última, luego se comporta en forma plástica hasta la rotura).

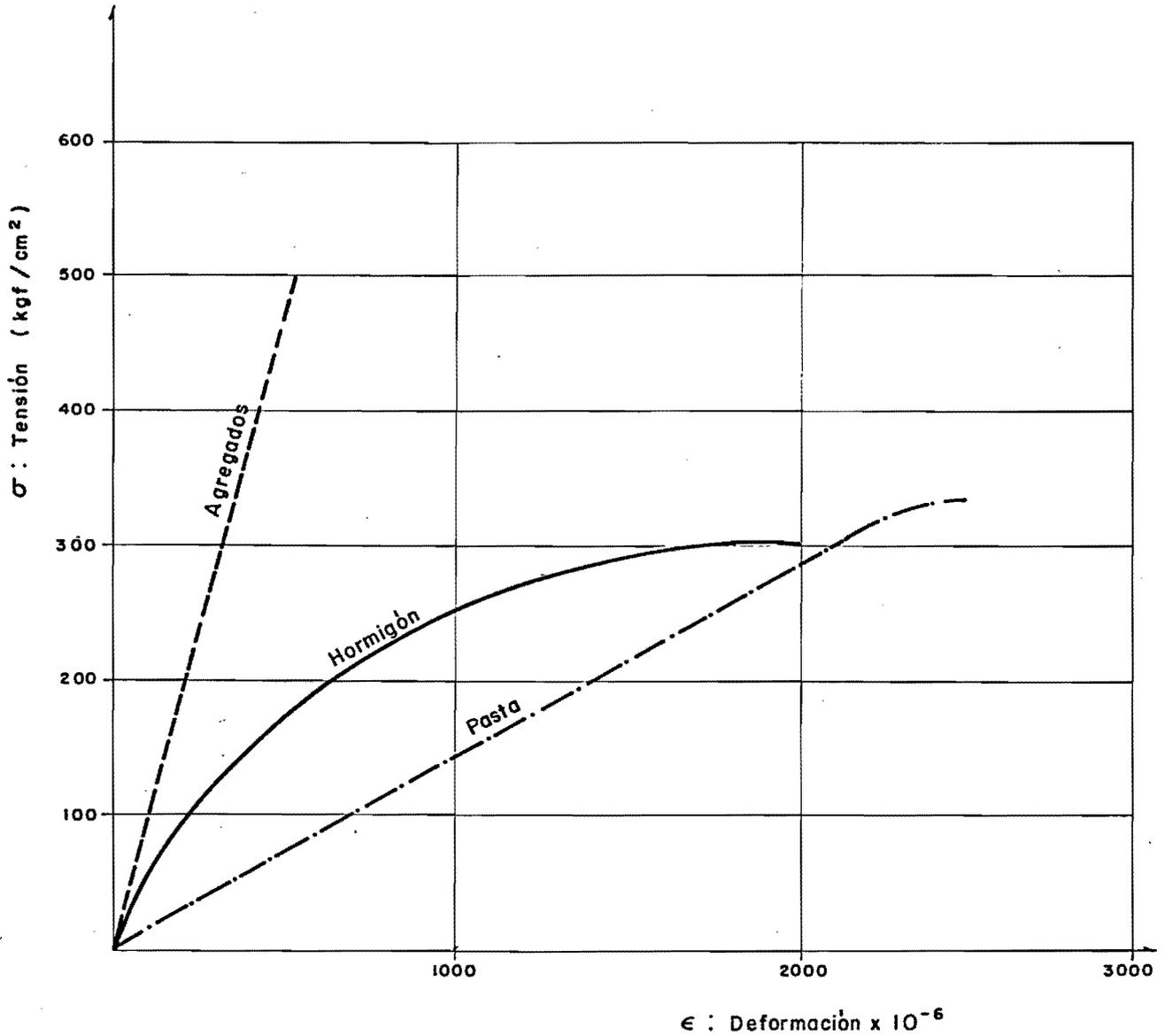


FIGURA 2. Curvas tensión - deformación para agregados, Hormigón y Pastas Hidratadas (cemento + agua)

En el gráfico se puede notar como el comportamiento de los componentes del hormigón ensayados independientemente, es aproximadamente lineal (pasta y agregados) pero el del hormigón no lo es¹⁴. Esto se puede explicar analizando la interfase (la unión entre agregados y pasta) que obliga a aumentar las deformaciones con bajos incrementos de carga. Hoy en día se está trabajando ampliamente en la producción de hormigones de alta resistencia mejorando las características de la interfase en el hormigón, se ha encontrado que la curva $\sigma - \epsilon$ en estos casos es casi lineal hasta la rotura.

El uso de aditivos químicos para el hormigón, surgió ante la necesidad de utilizar el material para múltiples aplicaciones prácticas. Así, para lograr una mayor durabilidad ante el fenómeno del congelamiento, y deshielo fué necesario adicionar al hormigón un aditivo inclusor de aire o un cemento con aire incluido. Para colocar el hormigón en regiones cálidas se ideó un retardante del fraguado, lo mismo que en regiones muy frías un acelerante del fraguado. Para aumentar la trabajabilidad o reducir el agua de mezclado sin afectar otras propiedades se inventaron los plastificantes y hoy en día, los superplastificantes. En resumen existen gran cantidad de aditivos químicos que permiten lograr propiedades especiales en el hormigón. En las normas A.S.T.M. C260 y C494² se especifican los requisitos

que deben cumplir los aditivos para las mezclas de hormigón.

Actualmente existen muchos métodos de diseño de mezclas que podemos agrupar en dos categorías. Los que utilizan combinaciones granulométricas ideales para el hormigón, por ejemplo: Fuller - Thompson, Bolomey, Weymouth, Faury, Joisel, Valette, etc., y los que utilizan resultados empíricos, por ejemplo A.C.I.; B.S.; CCCA. De los primeros hablaré en los capítulos III, IV y V, de los segundos en los capítulos I y II.

1.4 Propiedades del Hormigón:

Las proporciones del hormigón deben seleccionarse en tal forma, que el producto resultante cumpla con los requisitos de colocación adecuada para cada tipo de obra, con la resistencia, durabilidad, economía y peso unitario exigidos como requisitos mínimos a cumplir por el hormigón diseñado. En los siguientes apartes vamos a explicar más detenidamente estos aspectos.

1.4.1 Trabajabilidad:

Esta propiedad del hormigón fresco se puede definir como la facilidad con la cual se puede mezclar, transportar y compactar el hormigón con una determinada cantidad de ener-

gía¹². Como esta energía se gasta principalmente en eliminar el aire atrapado internamente, durante el vaciado del hormigón en las formaletas, para dar al material una configuración tan estrecha como sea posible, y en vencer la fricción entre la formaleta y el hormigón o el acero de refuerzo y el hormigón, es por lo tanto necesario aclarar que sólo la fricción interna (entre partículas de la mezcla), es una propiedad intrínseca del material y la definición anteriormente mencionada se debe entender como la cantidad de energía interna útil para compactar una mezcla completamente. Esta definición se debe a Glanville, Collins y Matthews del Road Research Laboratory¹², quienes han aportado innumerables técnicas en este campo.

La trabajabilidad influye en la resistencia del hormigón endurecido ya que para lograr una resistencia adecuada es necesario compactar el material a su máximo peso por unidad de volumen. Está comprobado que la presencia de aire reduce mucho la resistencia del hormigón. Por ejemplo un 5% de aire puede disminuir la resistencia en más de un 30%, y aún un 2% de aire disminuye la resistencia en un 10%. El aire en el hormigón proviene del aire atrapado accidentalmente durante el vaciado de la mezcla y del aire que deja el exceso de agua en el hormigón al evaporarse. El aire en el primer caso depende de la granulometría de los agregados finos, y en el segundo caso de la relación agua-cemen-

to. Se puede concluir, que para cada trabajabilidad debe existir un contenido óptimo de agua, tal que la suma del volumen absoluto de agua y aire sea mínimo y la compactación adecuada. En la siguiente gráfica se puede ver la correspondencia entre la resistencia relativa y el peso unitario relativo del hormigón¹².

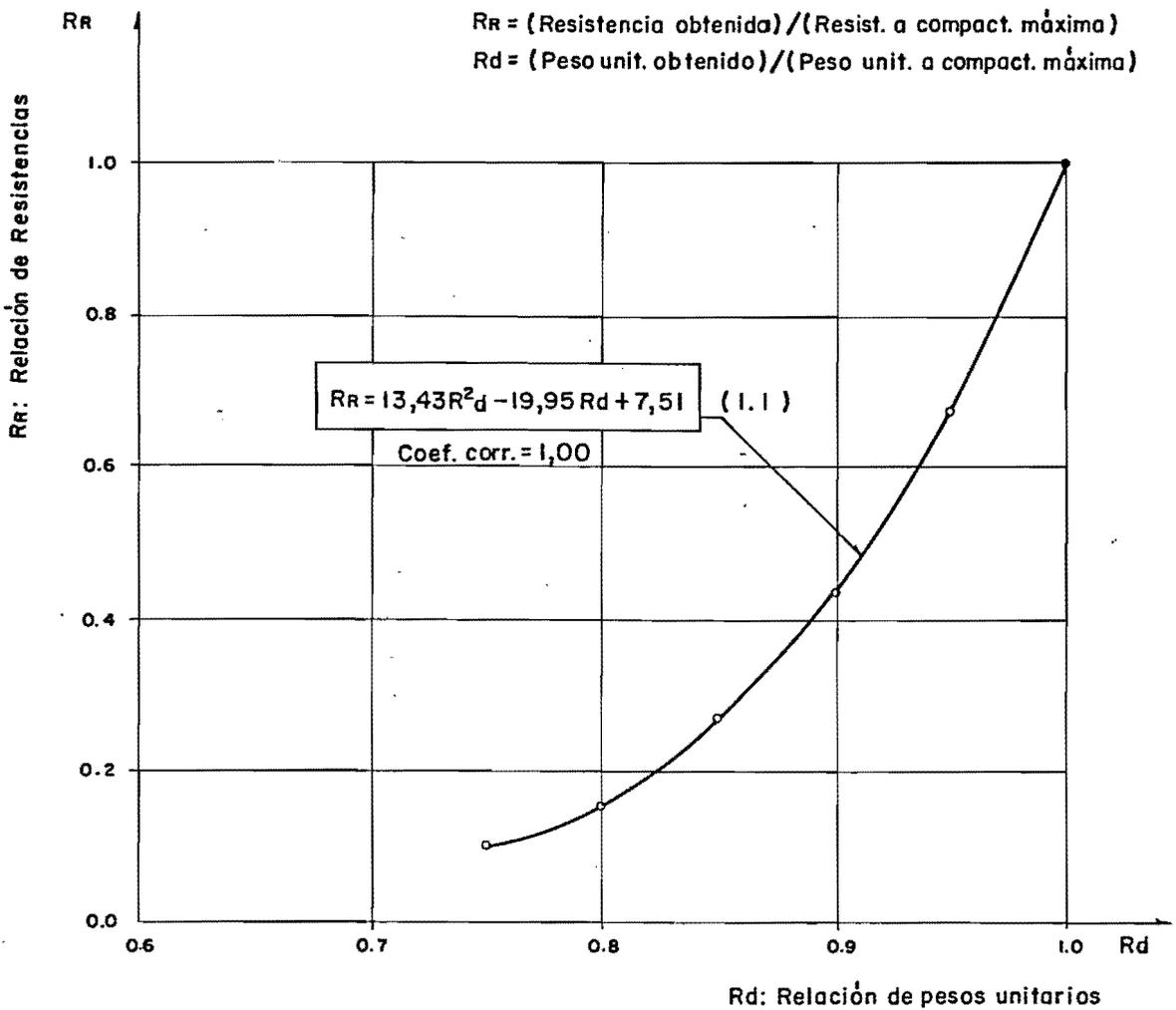


FIGURA 3. Curva que relaciona RR y Rd para el hormigón¹²

La ecuación obtenida utilizando la técnica de los mínimos cuadrados permite un mejor manejo de la gráfica veamos: en un ensayo el % de aire obtenido para el hormigón fué del 1% para un peso unitario de 2360 kgf/m^3 , hallar la R_d y R_R .

Para el 0% de aire el peso unitario del hormigón será:

$$\frac{2360 \text{ Kgf/m}^3}{(1 - 0,01)} = 2384 \text{ Kgf/m}^3$$

Es decir la $R_d = 0,99$; aplicando la ecuación 1 $R_R = 0,925$; es decir con este hormigón sólo se obtendrá un 92,5% de la resistencia obtenida cuando el hormigón se compacta a su máximo peso por unidad de volumen.

Para un 2% de aire $R_d = 0,98$ $R_R = 0,86$ con la ec. (1.1)

Para un 5% de aire $R_d = 0,95$ $R_R = 0,68$ con la ec. (1.1)

Lo que confirma realmente lo expuesto en los párrafos anteriores.

El principal factor que afecta la trabajabilidad de los hormigones es el contenido de agua de la mezcla. Ahora, si la cantidad de agua y las otras proporciones de la mezcla son fijas, la trabajabilidad dependerá del tamaño máximo del agregado, de su granulometría, forma y textura

superficial. La influencia de cada uno de estos factores permite determinar relaciones experimentales que se tienen en cuenta en esta práctica para dar una adecuada colocación del hormigón en la obra.

Existen por otra parte una serie de reglas empíricas que se deben tener en cuenta con respecto a este tema¹²:

- a. A mayor A/C se requiere una granulometría de agregados más fina para lograr trabajabilidad máxima.
- b. Para una trabajabilidad determinada existe una relación agregado grueso-agregado fino para la cual el contenido de agua es mínimo.
- c. La influencia de las propiedades de los agregados sobre la trabajabilidad decrece al aumentar la riqueza de la mezcla y desaparece para relaciones agregado-cemento del orden de 2,0 a 2,5 en peso.
- d. Si la relación agregado-cemento, se reduce, mientras que el A/C es constante, se eleva el contenido de agua y en consecuencia la trabajabilidad aumenta.
- e. Si el contenido de agua permanece constante y la relación agregado-cemento se reduce, entonces la relación

agua-cemento (A/C) disminuye y la trabajabilidad no se ve afectada en forma apreciable.

Desafortunadamente no existe una prueba fácil para medir la trabajabilidad del hormigón directamente; sin embargo se han diseñado una serie de métodos que determinan otra propiedad fácil de manejar, para luego correlacionar ésta con la trabajabilidad dentro de ciertos intervalos de aplicación. Entre estas pruebas podemos mencionar:

1.4.1.1 El ensayo de asentamiento: (Fig. 4)

Normalizado en A.S.T.M. C-143 (Icontec 396). Es una prueba muy usada actualmente en todo el mundo. Fué propuesta como norma en U.S.A. para determinar la trabajabilidad de los hormigones desde 1922. El equipo de ensayo es muy simple: un molde en forma de cono truncado de 30 cm. de altura, 10 cm. de diámetro superior y 20 cm. de diámetro inferior; el cual debe colocarse sobre una superficie lisa y llenarse con hormigón en tres capas, cada una compactada 25 veces con una varilla lisa de 16 mm de diámetro, redondeada en uno de sus extremos.

Una vez compactada la mezcla en el molde y nivelada la superficie superior, se levanta verticalmente el cono y se mide la disminución de la altura con respecto a la del mol-

de; este valor es el asentamiento del hormigón (detalles del ensayo se deben consultar en la norma correspondiente).

La prueba de asentamiento no mide exactamente la trabajabilidad del hormigón, pero si la resistencia al cortante cuando este fluye bajo su propio peso. Es útil para detectar variaciones en la uniformidad de una mezcla de proporciones definidas. Se ha encontrado, experimentalmente, que mezclas fabricadas con diferentes agregados que registran el mismo asentamiento, dan distintas trabajabilidades. Existe pues, un gran número de dificultades asociadas con el ensayo de asentamiento, que sumadas a las anteriores, nos permite concluir: 1) El ensayo es completamente empírico y no se relaciona con la definición inicial de trabajabilidad. 2) Para los casos prácticos se pueden lograr algunas correlaciones del ensayo con la trabajabilidad del hormigón (ver Tabla 2). 3) Es muy útil como control rápido de la calidad del hormigón fresco en obra.

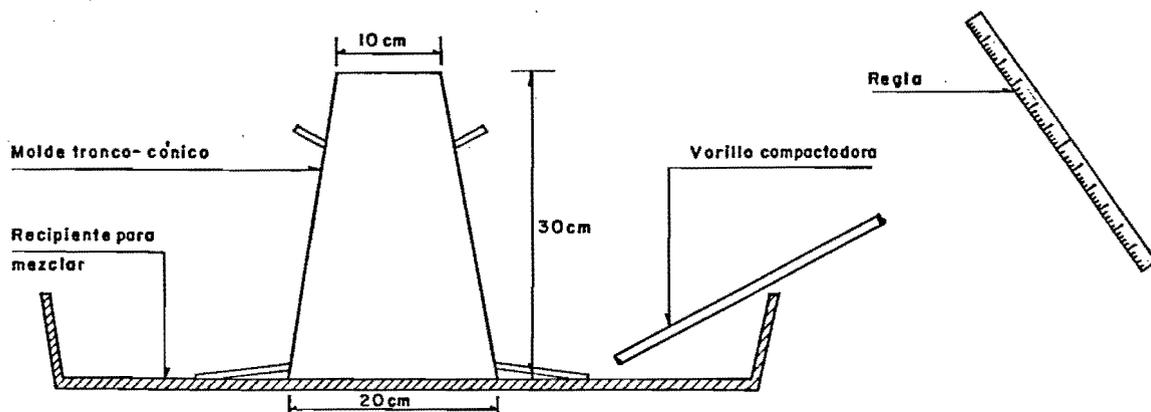


Figura No. 4: Equipo para ensayo de asentamiento

1.4.1.2 Ensayo de penetración con la esfera de Kelly²⁸

(Fig. 5)

Esta prueba desarrollada en U.S.A. por el Ingeniero Joe Kelly, en la Universidad de California, en el año 1955, ha logrado algunos progresos, para el control de la calidad del hormigón fresco en la obra, con resultados muy satisfactorios. Se encuentra normalizada desde el año 1963 en el A.S.T.M. C-360. Es un ensayo sencillo, consistente en determinar la profundidad a que una semiesfera de metal de 152 mm de diámetro y 13,6 Kgf de peso se hunde, bajo su propio peso, en el hormigón fresco. Se puede efectuar sobre una carretilla de transporte del hormigón en obra o directamente en la formaleta. Con el fin de evitar el efecto pared, la profundidad del hormigón que se prueba no debe ser menor de 20 cm., y la dimensión lateral no debe ser menor de 46 cm. No existe una correlación fácil entre esta prueba y el ensayo de asentamiento antes descrito ya que cada una mide propiedades distintas de la mezcla; pero para un hormigón en particular se puede encontrar una correlación como la mostrada en la Fig. 6.

En resumen el ensayo con la esfera de Kelly es una prueba sencilla de campo, rápida de hacer y no requiere tomar muestras de hormigón para su ejecución ya que se puede realizar directamente en la formaleta.

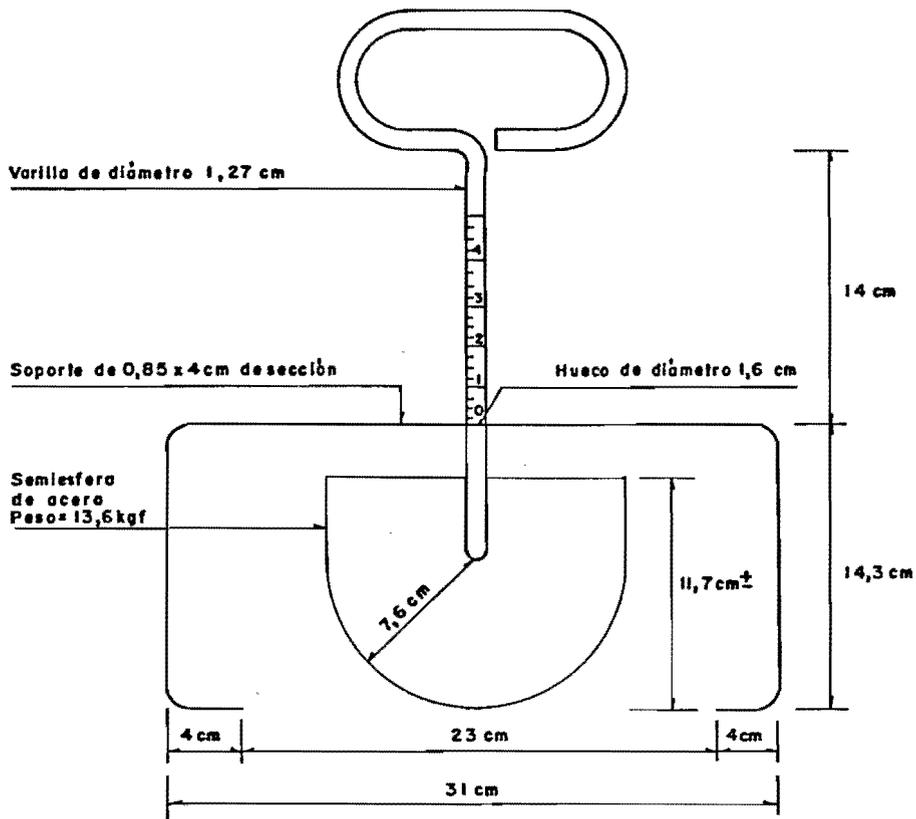


Figura 5: Medidor de la penetración Kelly²⁸

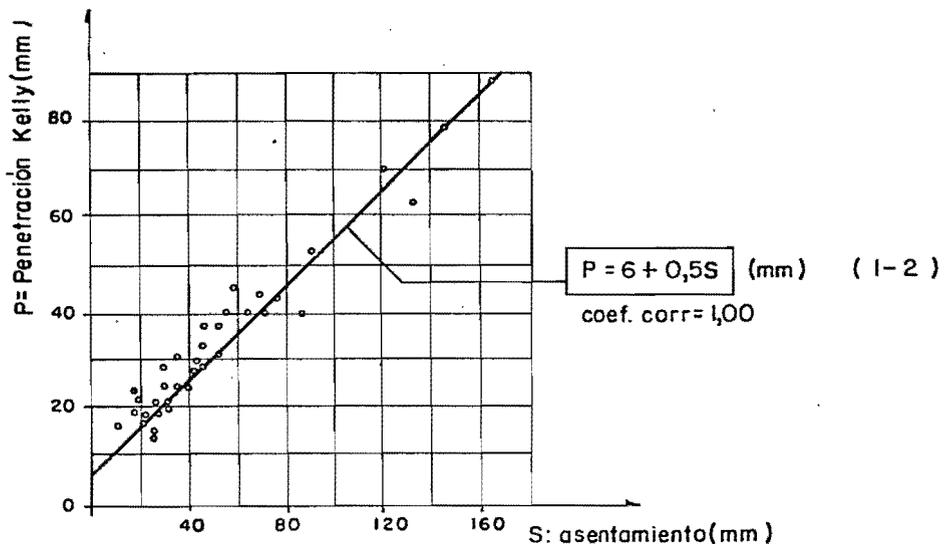


Figura 6: Relación entre la penetración y el asentamiento²⁸

1.4.1.3 Medidor de asentamiento K^{29,30}: (Fig. 7)

Entre los años 1969 a 1972, Nasser se ideó un método para determinar la trabajabilidad y la compactación del hormigón fresco; el K-SLUMP-TESTER. El dispositivo consiste en un tubo hueco de 19mm de diámetro y una longitud total de 34cm. La parte inferior tiene una terminación cónica, y sobre ella unos huecos que permiten la entrada de la parte fina del hormigón dentro del tubo. El equipo es insertado verticalmente en el hormigón fresco compactado (por ejemplo en un cilindro de 15cm x 30cm), hasta una profundidad especificada, luego es removido para leer la altura de la mezcla retenida en el medidor (o sea la que rellena los huecos del tubo). Esta altura es una medida de la trabajabilidad de la mezcla.

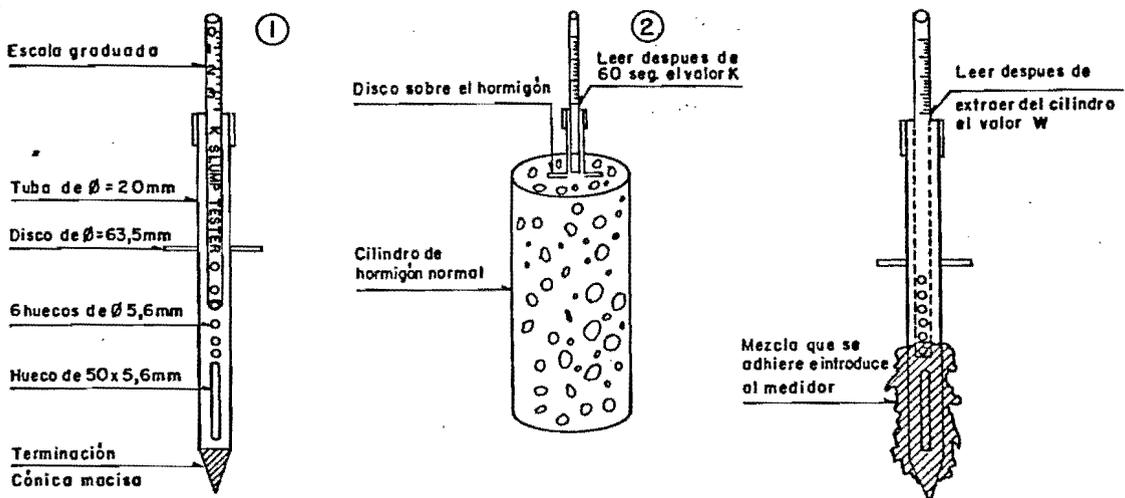


Figura 7: Medidor K en funcionamiento^{29,30}

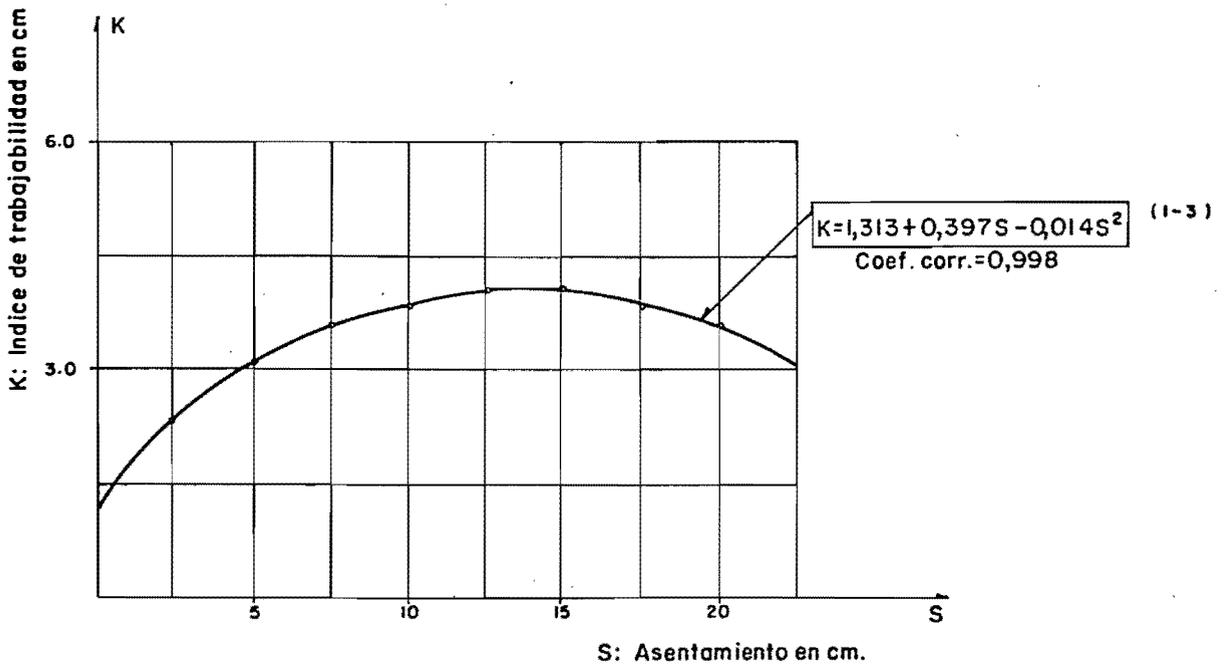


Figura 8: Relación entre el índice de trabajabilidad y el asentamiento del hormigón³⁰

El tema de la trabajabilidad de los hormigones es tan amplio que sin temor a equivocarnos, se podrían recopilar tantos ensayos experimentales que relacionados con esta propiedad bastarían para escribir un libro sobre este tema. En aras de la simplicidad voy a resumir algunos métodos de ensayo en un cuadro sinóptico para tratar de generalizar más sobre esta propiedad del hormigón fresco. (ver página siguiente).

Cada uno de los ensayos anteriores mide el comportamiento del hormigón bajo diferentes condiciones, por lo que una

comparación entre ellos no es fácilmente posible. Sin embargo se pueden detectar las siguientes conclusiones experimentales:

- a. La prueba del factor de compactación se relaciona estrechamente con el inverso de la trabajabilidad. Las de remoldeo y vebe están en función directa con la trabajabilidad.
- b. La prueba de fluidez es valiosa para evaluar la cohesividad de las mezclas en el laboratorio.
- c. Las pruebas de asentamiento y penetración son comparativas, la primera no es de confianza en mezclas pobres (bajos contenidos de cemento), para las cuales un control riguroso es importante.

En conclusión la prueba ideal de trabajabilidad está aún por diseñarse. En este aspecto la inspección visual y la evaluación práctica son vitales, y una vez se adquiera destreza resultan rápidas y de confianza.

La Tabla 2 resume algunas relaciones existentes entre los diferentes métodos expuestos.

TABLA 2. Relación entre algunos métodos de ensayo descritos en la Tabla 1.

(1)	Asentamiento en el cono de Abrams (cm)	Tiempo Vebe (s)	Grado de compactación en el vaso de Walz	Coefficiente en el plas- ticómetro de resorte	Escurrecimiento en % mesa de sacudidas	Ensayos C.E.S. número de golpes para D = 20 mm. G/A
Muy seca	0	40/20	1,54 - 1,47			---
Seca	0	20/10	1,47 - 1,31	4,5	10 - 30	≥ 70
Semiseca	1	10/5	1,31 - 1,26	5		70 - 60
Plástica	2 - 4	5/3	1,26 - 1,19	5 - 6	30 - 50	60 - 30
Blanda	5 - 9	---	1,16 - 1,09	7 - 12	50 - 70	30 - 15
Fluída	10 - 15	---	1,07 - 1,04	13 - 18	70 - 100	15 - 5
Líquida	> 15	---	1,04	> 18	100 - 160	< 5

Nota: Los diferentes valores no son rigurosos y no tienen forzosamente que relacionarse estrictamente entre ellos. Las diferencias que se podrán observar provienen de la granulometría, de la dosificación de cemento, de la granulometría de la parte fina de la arena, además de la dispersión del ensayo.

1.4.2 Resistencia:

Desde el punto de vista estructural, ésta es la propiedad más importante por la cual juzga el ingeniero la calidad del hormigón fabricado. Normalmente se especifica evaluarla sobre probetas testigo tomadas en el momento de colocar el hormigón en la estructura (caso más general como control de aceptación del hormigón vaciado. En plantas de mezclas se realiza además de lo anterior un control de producción del hormigón).

Existen varias probetas para la evaluación de la resistencia del hormigón: la cilíndrica es la más utilizada hoy en día en todo el mundo para determinar la resistencia a la compresión simple del hormigón y también para la resistencia a la tracción por compresión f'_{ct} (ensayo brasilero); el cilindro más usado es el de dimensiones $\phi = 15\text{cm}$ (6") y $h = 30\text{cm}$ (12") para hormigones con agregados hasta de 38mm (1¹/₂"); cuando el hormigón tiene tamaños superiores se permite tamizar los agregados mayores de 38mm para fabricar los cilindros de dimensiones normales. Actualmente está en proceso de investigación en los U.S.A. el uso de cilindros de $\phi = 7,5\text{cm}$ (3") y $h = 15\text{cm}$ (6") para agregados hasta 25mm (1") de tamaño (que hoy en día son los más usuales en el hormigón armado y pretensado), cuyas ventajas con respecto a los cilindros de 15 x 10cm son amplias (Ref 15).

Algunos países europeos (por ejemplo Alemania) utilizan para evaluar la resistencia a la compresión simple del hormigón (σ'_{cu}) una probeta cúbica de arista $a = 15\text{cm}$. Aproximadamente se puede hallar una relación entre f'_c y σ'_{cu} ; en muchos casos se han encontrado valores de $f'_c = 0,85 \sigma'_{cu}$. Para evaluar la resistencia a la tracción por flexión o módulo de rotura del hormigón se fabrican vigas de sección $b = h = \frac{L}{3}$ donde $L =$ luz de la viga y para agregados hasta de 38mm ($1\frac{1}{2}''$) de tamaño se usa $L = 45\text{cm}$. La viga se ensaya con cargas concentradas en los tercios medios (A.S.T.M. C-78) o con carga concentrada en la mitad de la luz (A.S.T.M. C-293).

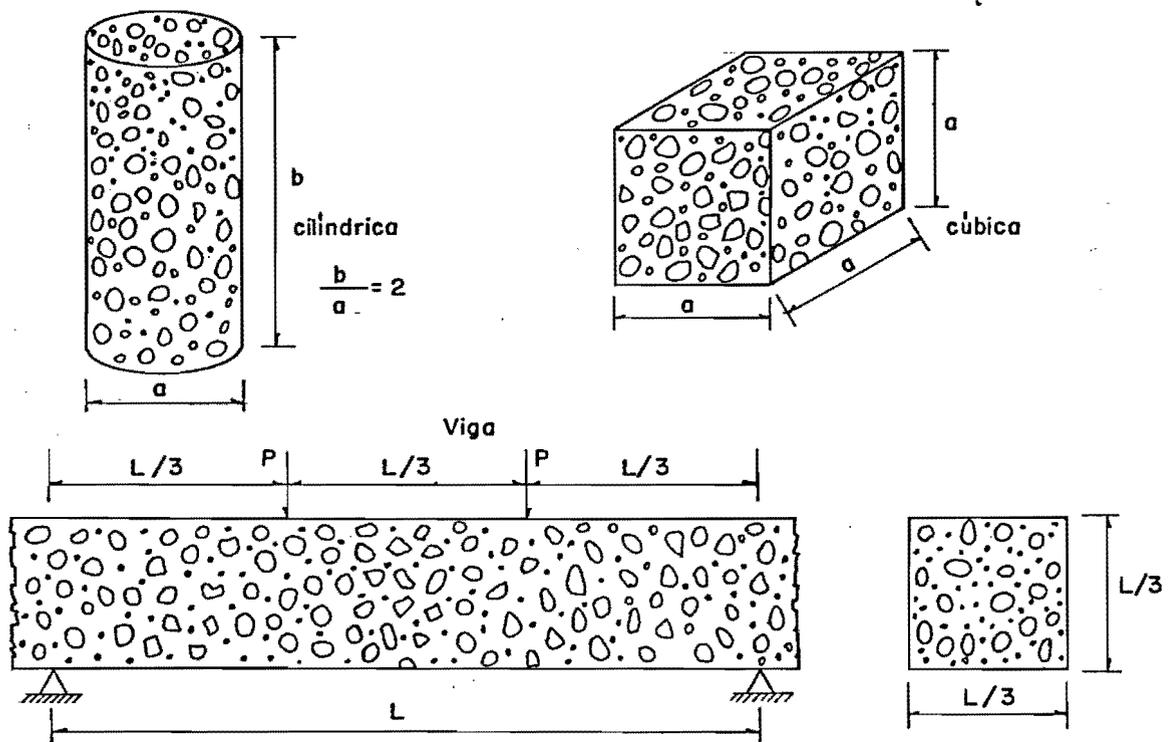


Figura 9: Diferentes probetas para ensayo de resistencia del hormigón.

El uso de probetas de la forma y dimensiones mostradas fué uno de los primeros pasos utilizados por los científicos para tratar de normalizar esta propiedad. Inicialmente se ensayaron muchas formas hasta hallar la que mejor comportamiento estadístico presentaba. Pero como la resistencia del hormigón depende de muchas más variables, se hace indispensable hoy en día el uso de procedimientos normalizados para evaluar la calidad del material. Estos procedimientos figuran en las normas A.S.T.M. (ver capítulo VI) y también en nuestras normas Icontec. A pesar de esto, la variación en la resistencia de un mismo hormigón fabricado es casi inevitable, y se debe aceptar y manejar con las técnicas más modernas de control de calidad estadístico aplicado al hormigón.

Sin embargo hace ya 70 años Andrew Duff Abrams, después de un estudio experimental con hormigón, hecho en el Instituto Lewis, Chicago¹⁶, enunció una regla importante para el control de la resistencia del hormigón: "para mezclas plásticas, con agregados limpios y bien gradados, la resistencia del hormigón es dependiente de la cantidad de agua por unidad de cemento". Esta regla fué tomada como ley en diseño de mezclas por muchos años; hoy en día se puede utilizar como referencia histórica ya que existen reglas más generales donde intervienen otros factores no tenidos en cuenta por Abrams en esa época, (más adelante explicaremos

esto), como por ejemplo la calidad del cemento. La representación matemática propuesta por abrams fué

$$f'c = \frac{K_1}{K_2 A/C} \quad \text{para } \frac{A}{C} > 0,40 \text{ en volumen suelto}$$

donde K_1 y K_2 son constantes experimentales obtenidas por mínimos cuadrados al efectuar un ajuste regresivo a los resultados de los ensayos. K_1 y K_2 varían con la edad y condiciones de curado. Experimentalmente se ha comprobado que mezclas de hormigón con la misma A/C y los mismos materiales producen resistencias con amplios intervalos de variación dependiendo del control de fabricación utilizado en la confección del material; por lo que se hace indispensable interpretar la resistencia del hormigón $f'c$ no como un valor absoluto, sino más bien como una variable estocástica (Ref. 6) cuya función de densidad de probabilidades (F. D.P.) se puede conocer cuando se ejecuten proyectos controlados con respecto a la resistencia $f'c$. Para esto último las normas recomiendan pautas a seguir en el control de calidad, veamos:

Sea $f'c$: Resistencia a la compresión del hormigón especificada en los cálculos y planos estructurales del proyecto (es un valor característico*)

* El valor característico de la resistencia de un material es aquel valor que deja un porcentaje muy bajo de valores inferiores a él.

σ_n : Desviación típica obtenida de pruebas de resistencia con cilindros fabricados en condiciones similares y con los mismos materiales.

f'_{cr} : Resistencia crítica de diseño, que garantiza con cierta probabilidad, que se cumple f'_c .

El código A.C.I. 318-83¹⁷, que es el utilizado por el ingeniero encargado de llevar este control recomienda: (1) La probabilidad de tener resultados de resistencia por debajo de $f'_c - 35 \text{ Kg/cm}^2$ debe ser menor del 1% (cuando el resultado de resistencia es el promedio obtenido al fallar dos probetas de hormigón). (2) La probabilidad de tener resultados de resistencia por debajo de f'_c debe ser menor del 1% (cuando el resultado es el promedio de tres ensayos de cilindros).

Si aceptamos que la resistencia del hormigón (f'_c) se distribuye aleatoriamente como una función normal (esto ya está demostrado experimentalmente) tenemos: (Ref. 6)

$$f(f'_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \text{Exp} \left[-\frac{(f'_c i - \bar{f}'_c)^2}{2\sigma_n^2} \right]: \text{ F.D.P. con}$$

$$\bar{f}'_c = \sum_{i=1}^n f'_c i / n \quad \sigma_n = \frac{\sum_{i=1}^n (f'_c i - \bar{f}'_c)^2}{n - 1}$$

La probabilidad de tener resultados de resistencia desde $-\infty$ hasta $+\infty$ es

$$\Pr(-\infty < f'c < \infty) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma n} \text{Exp} \left[- (f'c_i - \bar{f}'c)^2 / 2\sigma n^2 \right] df'c$$

Si ahora hacemos el siguiente cambio de variable:

$$Z = \frac{f'c - \bar{f}'c}{\sigma n} \quad \text{y} \quad dZ = \frac{1}{\sigma n} df'c$$

Obtenemos:

$$\Pr(-\infty < Z < \infty) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Exp} -(Z^2/2) \quad dZ$$

Esta es la función normal estándar, cuya integración está tabulada en la mayoría de los libros de estadística, de tal forma que dado un valor de Z obtenemos la probabilidad correspondiente, y viceversa. En algunos casos donde no se disponga de una tabla se puede utilizar la siguiente expresión aproximada para evaluar la integral:

$$\phi(Z) = \frac{1 + \sqrt{1 - \text{Exp} -(2Z^2/\pi)}}{2}$$

o despejando Z para hallar su valor, conocida la probabilidad:

$$Z = \sqrt{\frac{\pi}{2} \left[\text{Ln}(1 - (1 - 2 \times \phi(Z))^2) \right]}$$

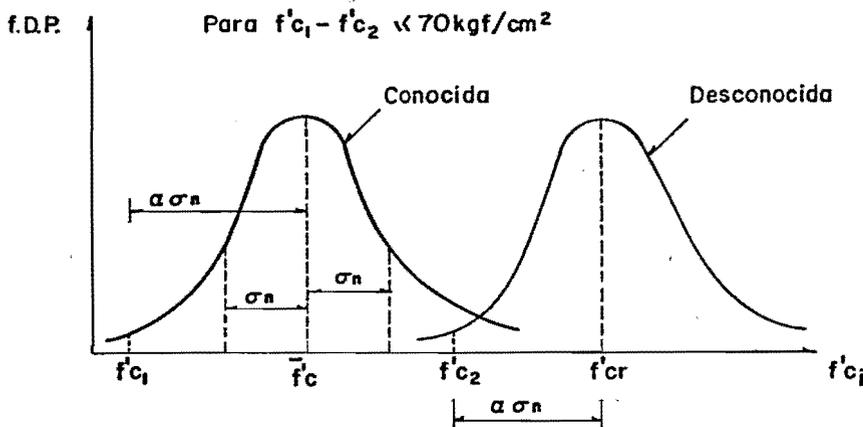
Aplicando la fórmula aproximada o buscando en tablas hallamos para una probabilidad del 1% un valor de $Z = -2,326 = -2,34$

como $Z = \frac{f'c - \bar{f}'c}{\sigma_n} = -2,34$ $\bar{f}'c = f'c + 2,34 \sigma_n$

→ Para la regla (1) obtenemos $\bar{f}'c = f'c - 35 + 2,34 \sigma_n <$
 Para la regla (2) obtenemos $\bar{f}'c = f'c + \frac{2,34}{\sqrt{3}} \sigma_n = f'c + 1,34 \sigma_n^*$

El $f'cr$ es el promedio de una nueva distribución con el mismo σ_n de la anterior de promedio $\bar{f}'c$, en tal forma que este promedio $\bar{f}'c$ esté dentro de una probabilidad dada de la nueva. Podemos definir entonces las expresiones utilizadas por el A.C.I. 318-83 así:

$$\begin{aligned} f'cr &= f'c + 2,33 \sigma_n - 35 \quad (\text{Kgf/cm}^2) \\ f'cr &= f'c + 1,34 \sigma_n \quad (\text{Kgf/cm}^2) \end{aligned}$$



* Cuando se promedian más de dos cilindros, para hallar un valor individual, la desviación típica de los datos es: σ_n/\sqrt{n}

Las fórmulas anteriores se pueden aplicar directamente siempre y cuando σ_n sea conocido. Para esto se requiere tener registros de ensayos de resistencia bajo condiciones similares de trabajo y con más de 30 pruebas consecutivas (aunque se obtengan de 2 grupos de ensayos consecutivos). Cuando σ_n se obtiene de un grupo de ensayos menor de 30 pero mayor de 15, se debe multiplicar σ_n por los siguientes factores para hallar la f'_{cr} : Ref. (17).

TABLA 3. Factores de modificación de σ_n para diferentes números de ensayos consecutivos¹⁷.

Número de Ensayos consecutivos	Factor de Modificación de σ_n
< 15	Usar criterio de σ_n desconocido
15	1,16
20	1,08
25	1,03
≥ 30	1,00

Se puede interpolar linealmente para un número de ensayos intermedio.

Cuando no se conozca σ_n (frecuente en el medio) el valor de f'_{cr} se debe determinar de la siguiente forma: (Ref. 17).

TABLA 4. Valores de f'_{cr} cuando se desconozca σ_n

Si $f'c \leq 210 \text{ Kg/cm}^2$	$f'_{cr} = f'c + 70 \text{ Kg/cm}^2$
$210 < f'c \leq 350$ "	$f'_{cr} = f'c + 84$ "
$f'c > 350$ "	$f'_{cr} = f'c + 100$ "

En la siguiente gráfica se resumen los criterios utilizados por el A.C.I. para el cálculo de la resistencia promedio requerida por el hormigón (Figura 10).

Ejemplo No. 1: Se desea determinar cuál debe ser la resistencia promedio para la fabricación de un hormigón con un $f'c = 210 \text{ Kgf/cm}^2$ especificado en los planos, si la firma constructora tiene el siguiente registro de ensayos de resistencia del hormigón tomado de una obra de idénticas características que la a ejecutar:

Valores en Kgf/cm^2

1. 242	11. 312	21. 235	31. 223
2. 227	12. 250	22. 306	32. 201
3. 295	13. 241	23. 326	33. 289
4. 309	14. 239	24. 293	34. 205
5. 281	15. 272	25. 247	35. 219
6. 207	16. 189	26. 211	36. 196
7. 238	17. 257	27. 245	37. 249
8. 212	18. 286	28. 259	38. 275
9. 269	19. 277	29. 183	39. 263
10. 192	20. 223	30. 226	40. 275

Cada ensayo representa el promedio de dos cilindros.

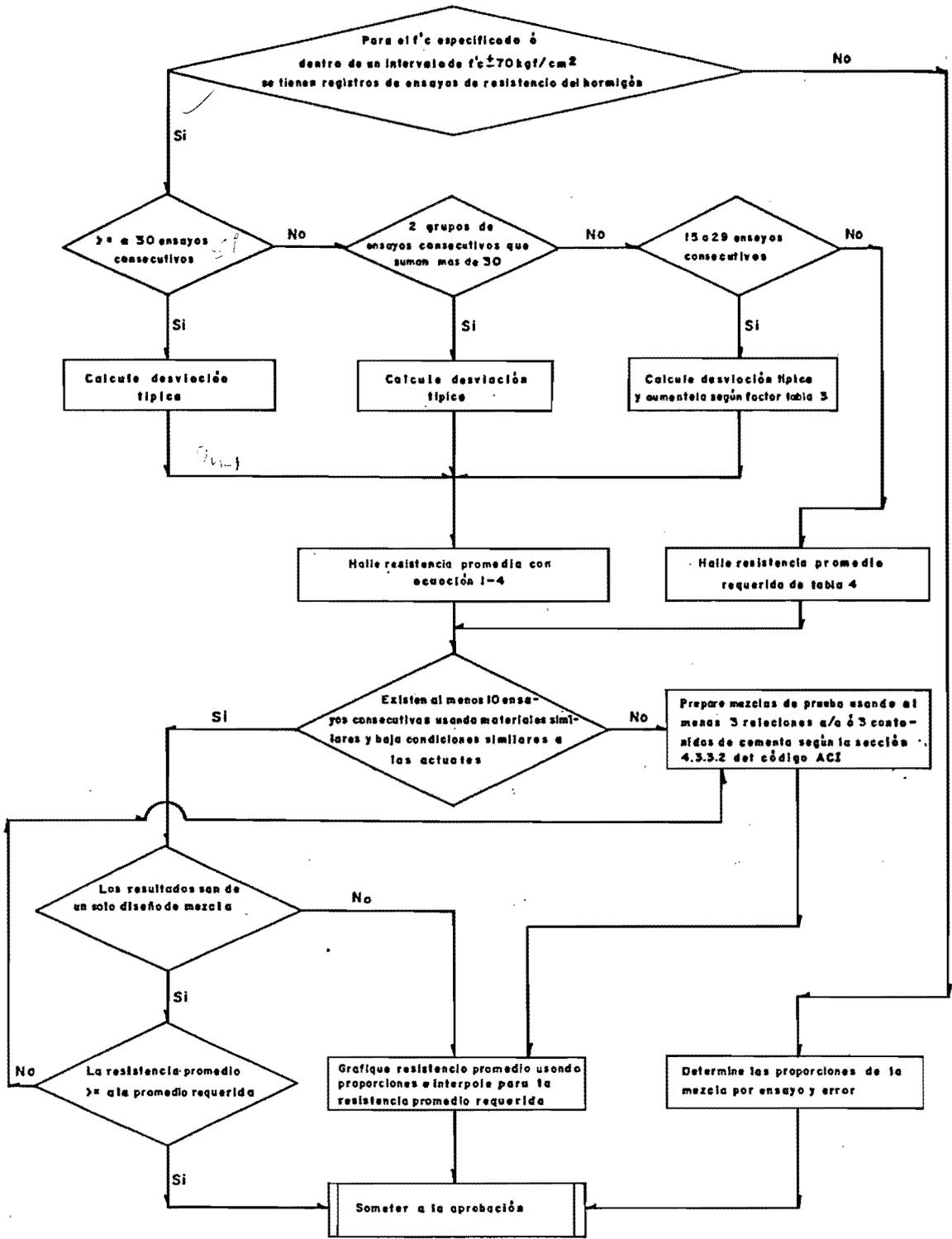


FIGURA 10. Procedimiento gráfico para la selección de las proporciones del hormigón según A.C.I. 318-83.17

Resistencia mínima = 183 Kgf/cm²

Resistencia máxima = 326 "

Rango = 143 "

$\bar{F}'c$: Resistencia promedio = 248,6 Kgf/cm²

sn: Desviación típica = 37,03 "

V: Coeficiente de variación = 14,9%

Calculemos la distribución de frecuencias relativas. Escogamos ocho intervalos de clase*:

Intervalo	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa (fr)	fr/L
180 - 199	4	0.100	0.00500
200 - 219	6	0.150	0.00750
220 - 239	7	0.175	0.00875
240 - 259	8	0.200	0.01000
260 - 279	6	0.150	0.00750
280 - 299	5	0.125	0.00625
300 - 319	3	0.075	0.00375
320 - 339	<u>1</u>	<u>0.025</u>	0.00125
	$\sum = 40$	$\sum = 1.000$	

l: donde L = longitud del intervalo de clase = 20 Kgf/cm²

* Generalmente se escogen entre 6 y 10 intervalos de clase.

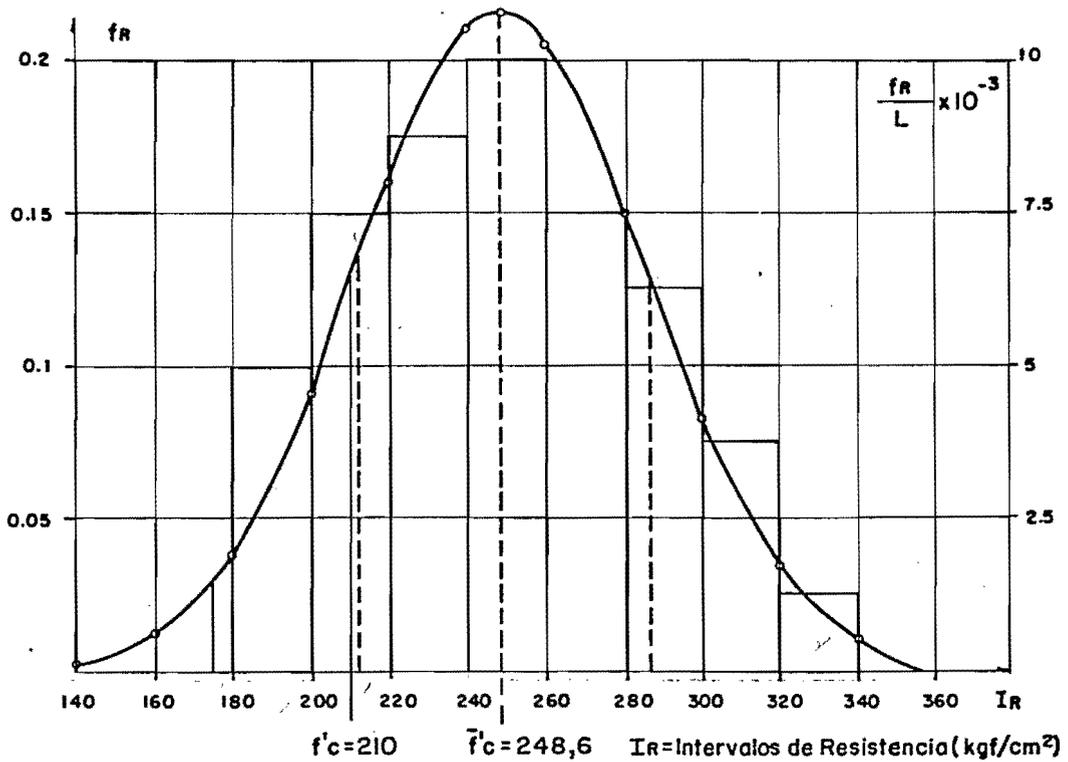


Figura 10A. Histograma de frecuencias para el ejemplo 1

Para dibujar la función normal

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} \text{Exp.} - (f'ci - \bar{f}'c)^2 / 2\sigma_n^2 =$$

$$0,0108 \text{Exp.} - (f'ci - 248,6)^2 / 2742,44$$

$f'ci$	$f(x)$	$f'ci$	$f(x)$
180	0.0019	260	0.0103
200	0.0045	280	0.0075
220	0.0080	300	0.0041
240	0.0105	320	0.0017
248,6	0.0108	340	0.0005

El Z para este hormigón es $Z = \frac{210 - 248,6}{37,03} = -1,042$; verificando la probabilidad

$$\left\{ \begin{aligned} \phi(Z) &= \frac{1 + \sqrt{1 - \text{Exp} - [2(-1,042)^2/\pi]}}{2} \approx 0,85 \quad \text{es decir el 85\%} \\ \text{del hormigón cumple el } f'c \end{aligned} \right.$$

Pero necesitamos que el 99% del hormigón cumpla el $(f'c - 35)$ Kgf/cm²

$$Z = \frac{175 - 248,6}{37,03} = -1,99 \quad \phi(Z) \approx 98\% \quad \text{es decir este hormigón tiene una probabilidad de aceptarlo del 98\%}$$

Pero volviendo al ejemplo propuesto calculemos para el nuevo hormigón de $f'c = 210$ Kgf/cm² cual debe ser la resistencia promedio requerida para el diseño de mezclas.

Aplicando ecuaciones (1-4)

$$f'_{cr} = 210 - 35 + 2,34 * 37,03 = 261,65 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$f'_{cr} = 210 + 1,34 * 37,03 = 259,62 \text{ Kgf/cm}^2$$

seleccionamos la mayor $f'_{cr} = 262 \text{ Kgf/cm}^2$

Ahora si en el ejemplo anterior sólo disponemos de los 20 primeros ensayos tenemos:

$$\sigma_{n-1} = 36,46 \text{ Kgf/cm}^2$$

Resistencia promedio = 250,90 Kg/cm²

Coefficiente de variación = V = 14,53%

Pero como $\sigma_n - 1$ es calculado con menos de 30 ensayos lo debemos mayorar multiplicando por un factor tomado de tabla 3. Obtenemos directamente $\sigma_n - 1 = 1,08 * 36,46$

$$\sigma_n - 1 = 39,38 \text{ Kg/cm}^2$$

y la resistencia promedio requerida será:

$$f'_{cr} = 210 - 35 + 2,34 * 39,38 = 267,15 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f'_{cr} = 210 + 1,34 * 39,38 = 262,77 \text{ Kg/cm}^2$$

Si incrementa el valor de f'_{cr} con el consiguiente aumento del costo del hormigón.

En el último caso de no conocer la desviación típica

$$f'_{cr} = 210 + 70 = 280 \text{ Kg/cm}^2$$

Como se puede notar claramente, un esfuerzo por mejorar el control de calidad del hormigón en la obra, se traduce en una gran economía en la construcción.

En conclusión la resistencia del hormigón se debe interpretar siempre como una característica del material, cuyo manejo requiere el conocimiento previo de la estadística básica. La interpretación correcta de que es el $f'c$ especificado en los planos y cálculos estructurales debe ser correcta y clara, lo mismo que el significado del $f'cr$ utilizado para el diseño y control de calidad de las mezclas de hormigón.

Es importante volver a recalcar que el $f'c$ no es la resistencia de la mezcla de hormigón sino un valor característico fijado por el ingeniero calculista con el fin de dimensionar y analizar el proyecto estructural. El ingeniero constructor para lograr cumplir con el valor, $f'c$, especificado tendrá que diseñar sus mezclas para una resistencia promedio $f'cr$, mayor que $f'c$ según su control de calidad en obra. Si el ingeniero constructor entiende ésto, seguramente tendrá pocos fracasos en su trabajo.

Una medida del control de calidad, muy usada en estadística, para comparar resultados experimentales realizados bajo controles diferentes, es el coeficiente de variación*. En el hormigón es muy útil para comparar resistencias obtenidas bajo diferentes formas de fabricación y control, pero

* Coeficiente de variación: V : Es la relación entre la desviación típica (σ_n) y la media aritmética (\bar{X}) de una población de resultados experimentales. Normalmente se expresa en porcentaje.

no se puede generalizar ya que por ejemplo en hormigones de alta resistencia a pesar de dar alta desviación típica, presentan bajos coeficientes de variación. El código A.C.I. ya no utiliza el coeficiente de variación en el diseño de mezclas. Pero para hormigones normales ($f'c = 210, 246, 280, 176 \text{ Kg/cm}^2$) se puede utilizar como criterio con resultados excelentes. La siguiente tabla expresa los coeficientes de variación para diferentes controles ya sea de laboratorio, o de campo.

TABLA 5: Valores del coeficiente de variación para diferentes controles¹

Coeficiente de Variación %		Grado de control
Ensayos totales *		
Laboratorio	Campo	
< 5	< 10	Excelente
5 - 7	10 - 15	Bueno
7 - 10	15 - 20	Regular
> 10	> 20	Malo
Ensayos Internos **		
< 3	< 4	Excelente
3 - 4	4 - 5	Bueno
4 - 5	5 - 6	Regular
> 5	> 6	Malo

* Cuando se trabaja con muestra grande de cilindros fallados periódicamente.
 ** Para muestras pequeñas de cilindros fallados consecutivamente.

Es indispensable, antes de terminar esta parte, que el lector estudie el capítulo IV del código A.C.I.-318-83¹⁷ o el equivalente título C-4 del código colombiano de construcciones sismo resistentes o también consultar el libro "Control Estadístico de la calidad del hormigón" de Gabriel García Moreno⁶, para una mejor aplicación de todos los temas aquí tratados.

Finalmente es importante responder a la pregunta ¿Qué procedimiento debemos seguir en caso de encontrar, en la construcción de una estructura, una resistencia del hormigón que no cumple los requisitos aquí expuestos?

Para la respuesta voy a transcribir el siguiente diagrama tomado de la referencia 11.

Este procedimiento fué propuesto en 1975 por un comité conjunto; C.E.B. (Comité Europeo del Hormigón), C.I.B. (Comité Internacional del Hormigón), F.I.P. (Federación Internacional del Pretensado), RILEM (Reunión Internacional de Laboratorios de Ensayo de Materiales), en un curso sobre control estadístico de la calidad del hormigón¹⁸.

1.4.3 Durabilidad¹:

Esta propiedad aunque algunas veces parece tener carácter

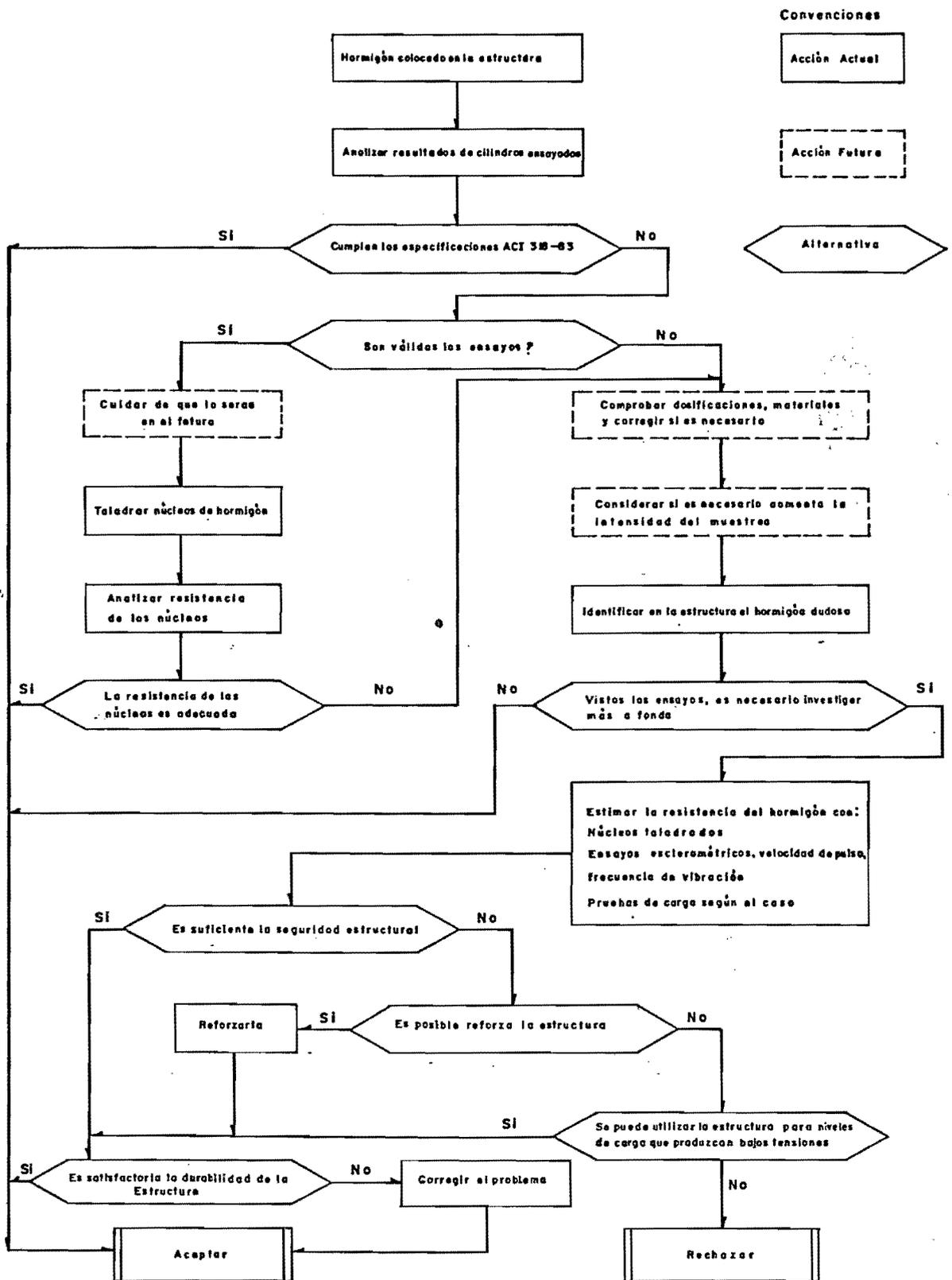


FIGURA 12. Diagrama de flujo del control de calidad del hormigón en obra¹¹.

secundario, es fundamental cuando el hormigón va a estar sometido a condiciones externas especiales, que le disminuyan su capacidad resistente. Es el caso del congelamiento y deshielo, humedad y secado, calentamiento y enfriamiento, ataques de sustancias químicas, sales descongelantes, meteorización, etc. El Comité A.C.I.-201 preparó un informe muy completo sobre esta propiedad del hormigón, del cual es importante recordar los siguientes aspectos:

- a. Para una adecuada resistencia del material al congelamiento y deshielo, se requiere utilizar buenos agregados (ASTM C33, Icontec 174), bajas relaciones A/C y aditivos inclusores de aire.
- b. Contra el ataque de sulfatos es recomendable utilizar un cemento portland tipo II ó V, y una mezcla correctamente diseñada.
- c. En el caso de ataque de ácido, si éste es leve, el hormigón puede resistir pero si es fuerte, se recomienda un recubrimiento especial.
- d. Si se requiere una alta resistencia al desgaste, como resultado de la acción abrasiva externa, como ejemplo, en pisos industriales, estructuras hidráulicas, pavimentos, es necesario usar un hormigón de alta resis-

tencia y en casos extremos agregados de alta dureza.

- e. Contra el descascaramiento en cubiertas de puentes, debido al uso de sales descongelantes, que a su vez producen corrosión del acero de refuerzo y expansiones, se recomienda usar un hormigón de baja permeabilidad, con aire incluido.

- f. En algunos casos ciertos agregados* pueden reaccionar con el cemento portland causando expansión y deterioro en el hormigón. Esto se puede corregir seleccionando correctamente la fuente de agregados y usando un cemento con bajo contenido de Alkalís (Na_2O , K_2O), o un cemento con adiciones puzolánicas (fly Ash).

Finalmente es imprescindible, para lograr una adecuada durabilidad del hormigón, un buen control de calidad y buenas prácticas constructivas, que junto con un correcto diseño de mezcla y adecuados materiales permiten cumplir con el objetivo deseado.

La tabla 6 especifica las relaciones A/C máximas permisibles para diferentes condiciones de exposición de las estructuras.

* Con algunos agregados silíceos, carbonatos, minerales de hierro.

TABLA 6. Relaciones A/C máximo por durabilidad. Ref. (1)

Tipo de Estructura	Continua o frecuentemente húmeda, sometida a hielo-deshielo ²	Exposición a sulfatos o al agua de mar
Secciones delgadas ¹	0,45	0,40 ³
Otras Estructuras	0,50	0,45 ³

1. Rieles, bordillos, durmientes, obras ornamentales y secciones con menos de 3 cm. de recubrimiento sobre el acero estructural.
2. El hormigón puede tener aire incluido.
3. Si se utiliza cemento portland II ó V, el valor se puede aumentar en 0.05.

La resistencia del hormigón al fuego es tema que es tratado por el comité A.C.I.-216 pero es importante tener en cuenta los siguientes puntos:

- a. Por ser el hormigón un material de baja conductibilidad térmica (su coeficiente de conductibilidad térmica está entre 0,9 y 2,0 BTU/ft.h.°F)* . La transmisión de calor en su interior es baja. En ensayos de

*. BTU: Unidad térmica británica

Ft: pies; h: hora; °F = grados Fahrenheit

laboratorio se ha encontrado que después de 2h de exposición del hormigón a una prueba estándar de fuego solamente los primeros 5 cm. de profundidad en el material alcanzan temperaturas mayores de 300°C, hasta esta temperatura, (300°C), el hormigón se comporta satisfactoriamente conservando aproximadamente el 75% de su resistencia.

- b. A temperaturas mayores el comportamiento del hormigón se manifiesta por una rápida disminución de su capacidad resistente, tal que a 600°C la resistencia es del orden del 20% - 30% de su resistencia de diseño.

1.4.4 Peso unitario:

2000 1kgF

Esta propiedad es esencial para ciertas aplicaciones del hormigón donde su peso por unidad de volumen se debe controlar estrictamente. Según el peso unitario se pueden considerar tres clases de hormigón: liviano, normal, pesado.

Hormigón Liviano: fabricado especialmente con agregados de bajo peso específico (arcilla expansiva, pumicita, vermiculita, perlita, puzolanas, escorias expansivas, etc.), permite lograr pesos unitarios entre 500 y 2000 Kg/m³ y se pueden utilizar en prefabricados, cubiertas para aisla-

miento térmico, y en estructuras en general donde se justifique la disminución de la carga permanente. (En U.S.A. han realizado obras como edificios de gran altura, coberturas con láminas delgadas, puentes de hormigón armado y pretensado, mejorando notablemente las características resistentes del material).

Hormigón Pesado: fabricado con agregados de alto peso específico (magnetita, barita, ilmenita, chatarra), suministra pesos unitarios entre 3000 y 7000 Kgf/m³. Se ha utilizado tradicionalmente como contrapeso en algunos puentes basculantes, pero más recientemente halló un gran campo de aplicación biológica contra las radiaciones atómicas, principalmente los rayos Gamma.

Hormigón Normal: Es el fabricado normalmente en la construcción con agregados de origen natural (rocas desintegradas aluvial o eólicamente, o trituradas mecánicamente), se obtienen pesos unitarios entre 2000 y 3000 Kgf/m³. Se utiliza en cualquier construcción y es el material a que nos vamos a referir en esta guía.

El control del peso unitario del hormigón normal en su estado fresco, nos permite estimar los datos necesarios para las correcciones en el laboratorio de las mezclas de prueba por lo tanto es una propiedad importante en diseño de

mezclas.

1.4.5 Economía:

Para lograr la mezcla más económica se requiere el uso de agregados con granulometrías ajustadas a las especificaciones establecidas en las normas A.S.T.M. C33 o Icontec 174. Estos agregados permiten utilizar dosis bajas de cemento. El uso de tamaños grandes de agregados reduce considerablemente el consumo de cemento, pero a su vez limita la utilización del material a determinado tipo de estructuras (masivas). En el caso del hormigón armado existen varias limitaciones para la escogencia del tamaño de los agregados; las dimensiones de la estructura, la distancia entre barras de refuerzo, las técnicas de colocación y transporte del hormigón en la obra (bombeo, lanzado, agregado precolocado, etc.).

El costo del hormigón es el costo de los materiales que lo conforman más el costo de fabricación (mano de obra y utilización del equipo). Sin embargo, excepto en casos especiales, el costo de fabricación es completamente independiente del tipo y calidad del hormigón producido. Es entonces el costo de los materiales, la variable que más afecta al evaluar el costo relativo de las diferentes mezclas de hormigón. De esto se sabe que es el contenido de cemen-

to el factor más importante para reducir los costos del hormigón.

La economía de una mezcla en particular estará también relacionada con el control de calidad que se espera llevar a cabo durante la fabricación del hormigón en la obra. Como se discutió en la sección 1.4.2 la resistencia promedio de la mezcla de hormigón, f'_{cr} , debe ser superior a la resistencia especificada en los planos y cálculos estructurales, f'_c , a causa de la naturaleza aleatoria de la resistencia del material. Es importante tener en cuenta que un esfuerzo por mejorar el control de calidad en obra del hormigón se traduce inmediatamente en una economía razonable para las mezclas de hormigón.

1.5 Información previa para el diseño de mezclas¹

Antes de comenzar un diseño de mezclas es necesario conocer los datos referentes a: la obra a ejecutar, los materiales disponibles y los registros de ensayos en obras anteriores. Veamos:

1.5.1 Datos de la obra:

- Las dimensiones de cada uno de los elementos estructurales (planos)
- La resistencia a la compresión especificada, $f'c$, del hormigón.
- Localización de la estructura
- Condiciones de fabricación y manejo del hormigón en obra.
- Las especificaciones recomendadas con respecto al contenido de cemento, calidad de agregados, calidad del agua, contenido de aire, asentamiento, aditivos.

1.5.2 Datos de los materiales.

- Análisis granulométrico de los agregados. Cálculo del

módulo de finura de la arena y estimación del tamaño máximo del cascajo.

- Pesos específicos aparentes y porcentaje de absorción de los agregados.
- La humedad de los agregados inmediatamente antes de preparar las mezclas.
- Calidad de los agregados; materia orgánica, partículas finas, reactivas, livianas, débiles.
- Calidad del agua de mezclado.
- Calidad de los aditivos. (A.S.T.M. C-494).

1.5.3 Los registros de obras anteriores referentes a ensayos del material:

- Resultados obtenidos con los agregados seleccionados para este diseño.
- Dosis de agua por metro cúbico de hormigón utilizado.
- Relaciones obtenidas entre A/C y $f'c$
- El cálculo estadístico de la desviación típica (σ_n) y

el coeficiente de variación (V) en ensayos de resistencia sobre cilindros de hormigón.

Con esta información recopilada se procede a comenzar el diseño de la mezcla de hormigón.

1.6 Procedimiento para el diseño de mezclas de hormigón:

Se recomienda seguir los siguientes pasos en la obtención del hormigón definitivo, es decir aquel material que cumple satisfactoriamente con los requisitos de, resistencia a la compresión, durabilidad, trabajabilidad, peso unitario, economía.

1.6.1 Elección de la trabajabilidad de la mezcla: si no se encuentra especificada como dato de entrada, se puede elegir una trabajabilidad adecuada para el hormigón a diseñar. La tabla 7 permite seleccionar un valor apropiado siempre que se utilice vibración para la compactación del hormigón. Como la trabajabilidad no es una propiedad fácil de medir en forma directa, se puede utilizar un ensayo indirecto que mida otra propiedad ligada con la trabajabilidad (fluidez, consistencia, penetración) y definir sobre ésta las características del material. Por lo general se asume el ensayo de asentamiento como prueba estándar para definir esta propiedad; pero se debe hacer acla-

ración con respecto a esto, ya que la prueba de asentamiento lo que mide es la consistencia (facultad del hormigón fresco para sostenerse fuera del molde con más o menos deformación bajo su propio peso), y variaciones en ésta por cambios en el contenido de agua del hormigón. Sin embargo dentro de los límites de utilización normal, el ensayo de asentamiento es valioso como evaluación preliminar de la trabajabilidad del hormigón fresco y además es una prueba rápida, económica y sencilla.

1.6.2 Elección del tamaño máximo* del agregado: este se fijará de acuerdo a las dimensiones de la estructura, posición del refuerzo y disponibilidad de materiales. Por economía los tamaños grandes de agregado permiten usar dosis bajas de cemento y por lo tanto (en igualdad de otras condiciones) bajos contenidos de agua, por lo que la contracción será menor. Las normas A.C.I. recomiendan usar, para hormigón armado, un tamaño máximo de agregado que no exceda:

$$f_m < \frac{1}{5} \text{ men. dim. lados fo.}$$

a. Un quinto de la menor dimensión entre los lados de la formaleta.

b. Un tercio del espesor de las losas.

* Según la A.S.T.M. es el tamaño del agregado cuyo porcentaje retenido acumulado en las mallas normalizadas es menor o igual al 5%.

c. Tres cuartos del espaciamiento libre entre las barras de refuerzo, haces de varillas o cables pretensados.

En algunos casos se pueden obviar estas especificaciones, si a juicio del ingeniero la trabajabilidad y los métodos de compactación son tales, que el hormigón puede ser colocado sin que se formen cavidades o vacíos. Se ha demostrado experimentalmente que para una determinada relación A/C se pueden lograr mayores resistencias, si el tamaño máximo del agregado disminuye. Existe entonces una tendencia por parte de los constructores a usar tamaños bajos de agregado (por lo general entre 12mm(1/2") y 25mm(1")).

1.6.3 Estimación inicial de los contenidos de agua y aire en la mezcla: (A) (a). Prácticamente en este punto comienza el diseño de la mezcla, ya que los dos pasos anteriores constituyen todavía datos generales para el diseño. Para comenzar es necesario considerar que el contenido de agua por metro cúbico de hormigón, es función del tamaño máximo, granulometría y forma del agregado, de la trabajabilidad de la mezcla, del contenido de aire y finalmente, del uso de aditivos. Se puede asumir que el contenido de agua, para la mayor parte de las aplicaciones prácticas, depende del tamaño máximo del agregado y de la trabajabilidad (consistencia) de la mezcla.

La tabla 8 proporciona estimaciones iniciales con respecto a la cantidad de agua de mezclado requerida para hormigones elaborados con varios tamaños máximos de agregado, varias consistencias (asentamientos) y hormigones con y sin aire incluido.

Experimentalmente se ha comprobado que además de la granulometría del agregado, la textura superficial y la forma, afectan los contenidos de agua tabulados anteriormente; por ejemplo para un determinado agregado, el valor real de agua puede estar por encima o por debajo del especificado en la tabla, pero ésto no es muy importante, ya que existen otros factores que compensan estas diferencias. Es un hecho ya comprobado, que un agregado grueso redondeado y uno triturado, ambos con la misma granulometría y de calidad aceptable, pueden producir hormigones de aproximadamente igual resistencia a la compresión, utilizando la misma cantidad de cemento, a pesar de las diferencias en la relación A/C resultantes de los distintos contenidos de agua de mezclado. En resumen: la forma y textura superficial del agregado no constituyen un buen indicio de si un agregado está por encima o por debajo del promedio de su capacidad de producción de resistencia.

En la tabla 8 se indican también las cantidades aproximadas de aire que puede atrapar el hormigón, sin aire incluido, du-

rante el vaciado en las formaletas; y también los % de aire recomendados, para hormigones con aire incluido, en diferentes grados de exposición externa. El hormigón con aire incluido se debe usar siempre en estructuras sometidas al congelamiento y deshielo, agua de mar, sulfatos; la inclusión de aire mejora la trabajabilidad y la cohesión del hormigón, pero se debe tener en cuenta que estos dos últimos aspectos se logran secundariamente en este hormigón. En el informe del comité A.C.I. 212, capítulo III, se puede encontrar una amplia información para la inclusión de aire en el hormigón; es importante destacar que se usan en la mayoría de los casos aditivos inclusores de aire tales como: Sales orgánicas de hidrocarburos sulfonados, algunos detergentes sintéticos, ácidos grasos y resinosos, etc.

Para verificar la capacidad de producción de resistencia de una mezcla dada, se debe usar la combinación más desfavorable de contenido de aire y agua en tal forma que se evite una estimación demasiado optimista de la resistencia del material, suponiendo que las condiciones en obra son las promedio y no las extremas.

Dada la gran importancia que tiene la estimación del contenido de agua de la mezcla, muchos investigadores han tratado de formular ecuaciones simples para su cálculo, sin embargo, dada la gran variabilidad del material, es muy difí-

TABLA 8. Valores aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaño máximo de agregado.

Asentamiento (cm.)	Agua en Kgf. por metro cúbico de hormigón para los diferentes tamaños de agregados especificados en mm. (Pulg.)							
	10mm (3/8")	12,5 (1/2")	20 (3/4")	25 (1")	40 (3/2")	50** (2")	70** (3")	150** (6")
3 - 5	205	200	185	180	160	155	145	125
8 - 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 - 18	240	230	210	205	185	180	170	---
%deaire atrapado	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3	0,2

Hormigón con aire incluido

3 - 5	180	175	165	160	145	140	135	120
8 - 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 - 18	215	205	190	185	170	165	160	---

% de aire recomendado

Para niveles de exposición

Bajos	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0
Moderados	6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5	3,0
Altos	7,5	7,0	6,0	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0

* Estas cantidades de agua de mezclado deben utilizarse en los cálculos del contenido de cemento para mezclas de prueba, son los máximos recomendados para agregados gruesos angulares, razonablemente bien gradados, según los límites de las especificaciones A.S.T.M. C33 (Icontec 174).

** Los valores de asentamiento para hormigones que contengan un agregado de tamaño máximo mayor de 40mm. (3/2") están basados en pruebas de asentamiento efectuado, después de remover las partículas mayores de 40mm. por tamizado húmedo.

cil encontrar fórmulas rápidas que reduzcan el número de mezclas de prueba en el laboratorio, para encontrar el valor correcto del agua. Otros investigadores en cambio han tratado de llevar la tabla 8 a ecuaciones, por ejemplo Jerath y Kabbani, en un artículo publicado por el Journal A.C.I. julio agosto de 1983 proponen la fórmula¹⁹:

$$\text{Agua (Kgf)} = 218,80 (\text{asentamiento (mm)})^{0,1} / (\text{Tam.máximo(mm)})^{0,18}$$

para hormigón sin aire incluido y:

(1-4)

$$\text{Agua (Kgf)} = 172,25 (\text{asentamiento (mm)})^{0,11} / (\text{Tam.máximo(mm)})^{0,148}$$

para hormigón con aire incluido.

Pero es importante resaltar la importancia que tienen los valores tabulados (resultados experimentales) sobre los valores obtenidos con las ecuaciones ajustadas estadísticamente, ya que estos últimos tienen involucrados errores de ajuste a fórmulas matemáticas de manejo sencillo. Es recomendable para diseños de mezclas iniciales usar la tabla en lugar de las ecuaciones.

1.6.4 Cálculo de la resistencia crítica de la mezcla: (f'_{cr})

En la sección 1.4.2 de este manual discutimos con cierta amplitud este tema. En resumen debemos tener en cuenta lo siguiente: (a) si conocemos la desviación típica σ_n de un grupo de más de 30 ensayos de resistencia del hormigón, la

E: Paris
336240
Compani

resistencia crítica requerida se puede estimar de la gráfica mostrada en la figura 13, o utilizando las ecuaciones deducidas en 1.4.2. (b) si en cambio σ_n se conoce pero estimándola de un grupo entre 15 y 30 ensayos, se debe mayorar σ_n como se muestra en la sección 1.4.2 y calcular f'_{cr} de la figura 13. (c) cuando σ_n es desconocido o se calcula de un grupo de menos de 15 ensayos, no se puede utilizar la figura 13, sino los siguientes criterios:

Para el cálculo del f'_{cr} : (Tabla 4)

- Si $f'c \leq 210 \text{ Kgf/cm}^2$ $f'_{cr} = f'c + 70 \text{ Kgf/cm}^2$
- Si $210 \text{ Kgf/cm}^2 < f'c \leq 350 \text{ Kgf/cm}^2$ $f'_{cr} = f'c + 85 \text{ Kgf/cm}^2$
- Si $f'c > 350 \text{ Kgf/cm}^2$ $f'_{cr} = f'c + 100 \text{ Kgf/cm}^2$

La gráfica No. 13 resume los criterios del A.C.I. anteriormente descritos y facilita el proceso de diseño de mezclas. Su manejo es sencillo; conocida la desviación típica (σ_n), vamos con este valor al eje de las abscisas y subimos verticalmente hasta encontrar la curva del $f'c$ especificado, en este punto trazamos una línea horizontal y hallamos en el eje de las ordenadas el valor del f'_{cr} para el diseño de la mezcla. Por ejemplo si $\sigma_n = 25 \text{ Kgf/cm}^2$ y $f'c = 246 \text{ Kgf/cm}^2$
 $f'_{cr} = 280 \text{ Kgf/cm}^2$.

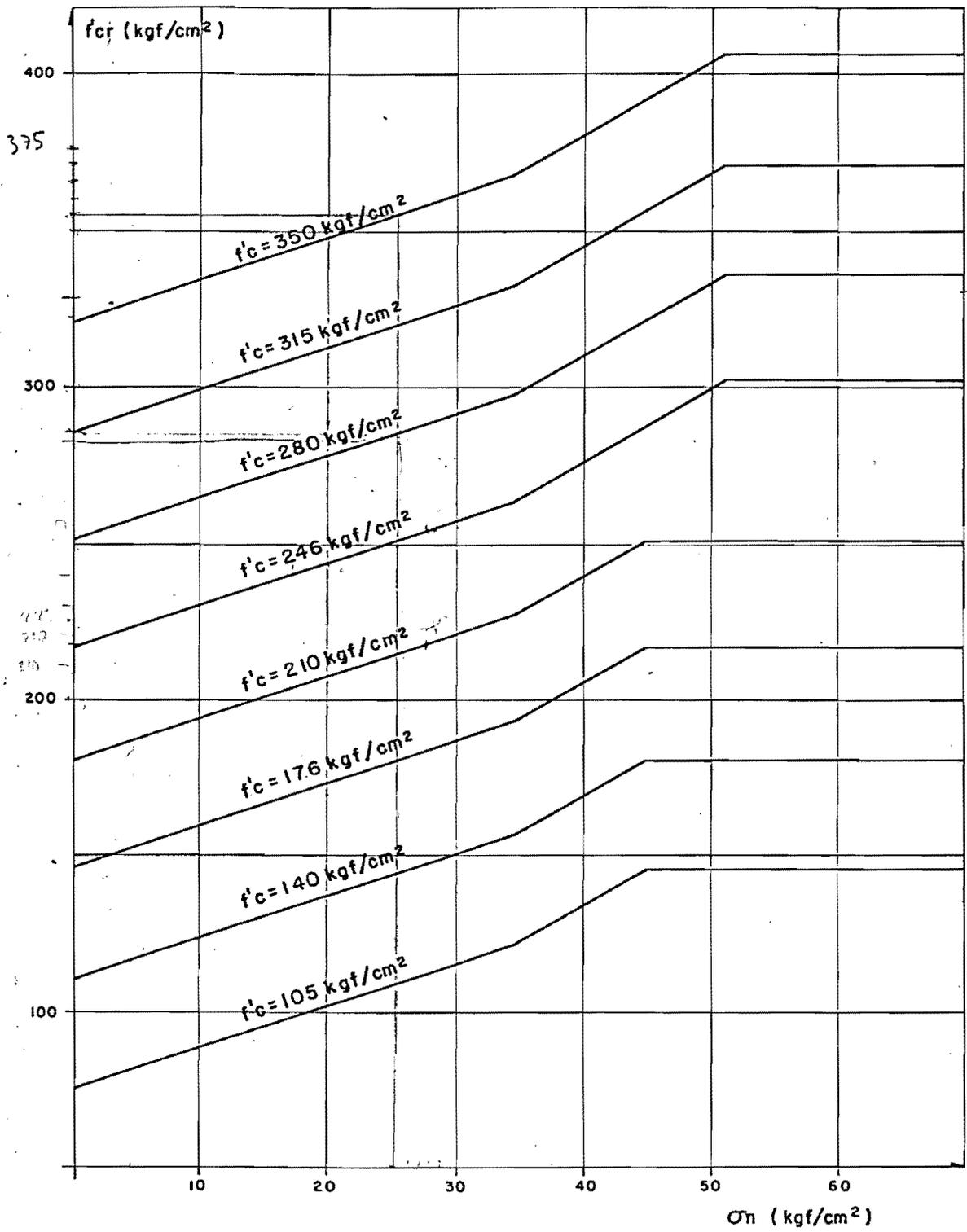


FIGURA 13. Relación entre f'_{cr} , f'_c y σ_n según A.C.I. 318-83¹⁷

1.6.5 Elección de la relación (A/C). Una de las hipótesis que utiliza el método del A.C.I. es la famosa regla de Abrams, enunciada en 1.4.2 y que indica la dependencia de la resistencia de la mezcla de hormigón de la relación Agua - Cemento. Esta regla elevada a ley durante muchos años ha sido utilizada en casi todo el mundo como ecuación básica en diseño de mezclas. Sin embargo desde un punto de vista más real, esta ley no toma en cuenta muchos factores que pueden afectar la resistencia, además de la relación A/C; uno de ellos y muy importante, es la calidad del cemento, y de los agregados. Es un hecho ya confirmado la gran variedad de fórmulas de Abrams obtenidas en varias partes, por ejemplo, hasta en una misma ciudad, hay laboratorios que utilizan diferentes valores para la ley de Abrams; esto fué confirmado en 1980 por Sandor Popovics quien publicó en el Journal del A.C.I.²⁰ una fórmula más generalizada que la de Abrams para el diseño de mezclas. Veamos algunos valores de éstas fórmulas. En Medellín se han publicado⁷:

$$f'_{cr} = \frac{985}{14,3^{A/C}} \text{ (Solingral) (Kgf/cm}^2\text{)} \quad (1-5)$$

$$f'_{cr} = \frac{605}{9,5^{A/C}} \text{ (U. Nal 1980) } \quad (1-6)$$

$$f'_{cr} = \frac{552,69}{4,86^{A/C}} \text{ (U. Nal 1986) } \quad (1-7)$$

En otras regiones:

$$f'_{cr} = \frac{1498,6}{80,1^{A/C}} \text{ (Manizales) (Kgf/cm}^2\text{)} \quad (1-8)$$

$$f'_{cr} = \frac{902,5}{8,69^{A/C}} \text{ (Venezuela) " } \quad (1-9)$$

$$f'_{cr} = \frac{1181}{14,58^{A/C}} \text{ (Argentina) " } \quad (1-10)$$

$$f'_{cr} = \frac{1224}{13,46^{A/C}} \text{ (U.S.A.1983) " } \quad (1-11)$$

La fórmula general de Popovics²⁰ es:

$$f'_{cr} = \frac{A}{B^{w/c}} \sqrt{\frac{S_s}{S_o}} \frac{(1 - P(\text{Exp}(-b_1 t)) - (1-P)\text{Exp}(-b_2 t))}{(1 - P(\text{Exp}(-90b_1)) - (1-P)\text{Exp}(-90b_2))} \quad (1-12)$$

(psi)

En donde:

A: 15500 psi (107Mpa) cuando se determina sobre cilindros de $\phi = 15$ cm y $h = 30$ cm*.

B: 6,4 para las mismas condiciones anteriores.

w/c: Relación agua-cemento en peso.

S_s y S_o : Superficies específicas del cemento utilizado y de uno patrón tipo I respectivamente (cm²/g)

P: Contenido de C_3S (silicato tricálcico) del cemento en %/100.

t: Edad del ensayo (días)

b_1 y b_2 : Parámetros que no dependen del C_3S ni C_2S pero

* Según A.S.T.M. C39 y C192.

pueden depender del C_3A , finura del cemento, temperatura de curado, constituyentes menores del cemento, relación w/c, aditivos, y otros factores que influyen el desarrollo de resistencia, tipo de resistencia, y método de ensayo.

En este manual vamos a utilizar la regla de Abrams tradicional y otras aproximaciones lineales obtenidas experimentalmente por nosotros en el Laboratorio de Ensayo de Materiales Universidad Nacional de Colombia, Seccional Medellín⁷, para la obtención de la A/C necesaria para el hormigón. La figura 14 resume las relaciones a usar

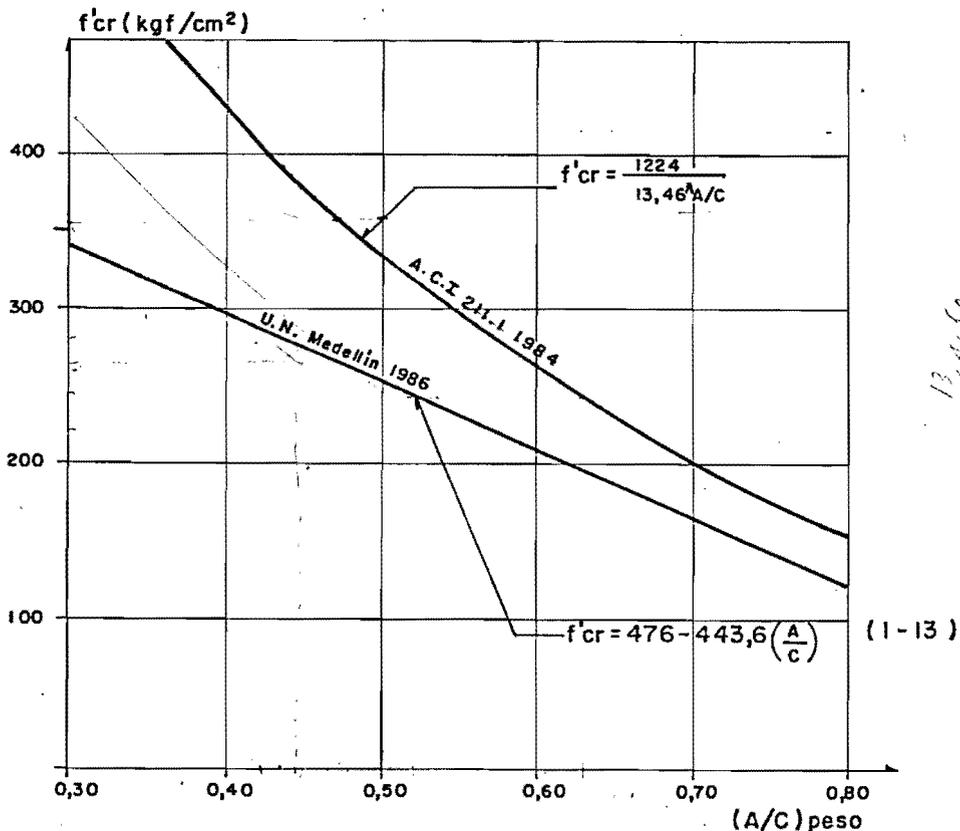


FIGURA 14. Relación entre f'_{cr} y (A/C) . Vibración normal. Mezclas sin adiciones.

Recomendamos utilizar la relación lineal obtenida por U.Nal. Medellín 1986, ya que refleja mejor el comportamiento de nuestros materiales y la forma de manejo del hormigón localmente. En la práctica no es aconsejable bajar la relación por debajo de 0,40 ya que el cemento para su hidratación requiere como mínimo esta relación $\frac{A}{C}^{11}$ (por ejemplo para lograr altas resistencias es necesario bajar la $\frac{A}{C}$ hasta valores inclusive menores que 0,30, como esto no es recomendable, es importante considerar mezclas con adiciones como por ejemplo Silica Fume, fly Ash, cemento alta resistencia (super cemento), aditivos super reductores de agua, etc.

En el otro extremo tampoco se recomienda valores de A/C mayores de 0,60, por durabilidad. En resumen el rango óptimo de la relación A/C para la mayoría de los casos prácticos en la construcción es de 0,40 a 0,60.

El manejo de la gráfica en la figura 14, es sencillo. Conociendo el f'_{cr} del paso anterior, entramos al eje de las ordenadas trazando una horizontal por este punto hasta cortar la recta propuesta, y luego bajamos verticalmente y hallamos el A/C requerido para la mezcla. Queda así determinada, la relación A/C por resistencia. Pero debemos tener en cuenta la tabla 6 de la sección 1.4.3, en tal forma que el A/C por resistencia no sea mayor que el obtenido de la tabla, para asegurar un hormigón resistente y durable.

En conclusión conocido el A/C por resistencia y el A/C por durabilidad el diseño se hará con el menor valor que es el que controla la mezcla.

1.6.6 Cálculo del contenido de cemento: (C). Una vez se conozcan, el contenido de agua por metro cúbico de hormigón (1.6.3) y la relación Agua-Cemento (1.6.5), la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón (C) se determina fácilmente dividiendo el agua estimada en Kgf por la relación A/C.

$$C = \frac{A(\text{Kgf})}{A/C} (\text{Kgf}) \quad \text{por metro cúbico de hormigón} \quad (1-14)$$

Muchas especificaciones, adicionalmente, fijan unos contenidos de cemento mínimos, para asegurar un terminado satisfactorio, adecuada trabajabilidad y un control contra posibles bajas de resistencias en el hormigón, por un incorrecto aumento del agua en el trabajo de campo. A falta de información o cuando la relación A/C no se pueda estimar por falta de datos, se puede utilizar los contenidos mínimos de cemento dados en la tabla 9, pero únicamente en hormigones con una resistencia especificada $f'c$ menor de 246 Kgf/cm^2 (3500psi).

1.6.7 Estimación del contenido de agregado grueso: (G). De las extensas investigaciones realizadas sobre la traba-

TABLA 9. Valores mínimos de contenido de cemento^a.

Mínimo contenido de cemento en Kg/m³ de hormigón^b

Resistencia a la compresión Especificada f' _c (Kg/cm ²)	Hormigón sin aire				Hormigón con aire			
	10	20	40	Tamaño máximo agregado mm.	10	20	40	Tamaño máximo agregado mm.
150	285	250	225	290	255	235	270	315
200	325	290	260	335	300	270	315	
250 ^c	365	320	290	390	340	315		
Máxima cant. de Agua (kg)	200	180	160	170	150	140		

a) Tabla tomada del CSA standard CAN-A23.1-M77. Ref. 11

b) Los valores mínimos de cemento se basan en hormigones cuyo asentamiento es menor a 10 cm. y los contenidos de aire de la tabla 8.

c) No se debe utilizar para f'_c ≤ 250 Kg/cm².

jabilidad de los hormigones, numerosos investigadores Norteamericanos, entre otros; Talbot, Richart, Goldbeck, Gray, Kellerman²¹ han concluido que: "Las mezclas de hormigón fabricadas con diferentes agregados gruesos del mismo tamaño tendrán el mismo grado de trabajabilidad cuando ellas contengan el mismo volumen de agregado grueso medido en la condición de seco y compactado". El profesor Dunagan²² en su trabajo sobre dosificación de hormigones 1940 llegó a la conclusión: "La trabajabilidad de las mezclas de hormigón que utiliza un agregado dado quedará aproximadamente constante, en la escala práctica de contenido de cemento, si a la vez, el agua, y el agregado grueso por volumen unitario de hormigón, se mantienen constantes". En otras palabras el profesor Dunagan establece que para unos agregados dados y un asentamiento especificado dentro de los límites prácticos de plasticidad del hormigón, es necesario dejar constantes el contenido de agua y el volumen absoluto de agregado grueso para mantener la misma trabajabilidad con cualquier relación A/C. Estas conclusiones fueron confirmadas por los ensayos realizados para fundamentar el método del A.C.I. que finalmente recomendó unos volúmenes de agregado grueso secos y compactados por volumen unitario de hormigón en función del tamaño máximo del agregado grueso y del módulo de finura del agregado fino, como se muestra en la tabla 10. (Adoptada de los estudios de Golbeck y Gray)²³.

Llamemos Vgsc: Volumen de agregado grueso seco y compactado con varilla, por volumen unitario de hormigón¹.

TABLA 10. Volúmenes de agregado grueso por metro cúbico de hormigón¹.

Tamaño máximo del agregado grueso mm. (pulg.)	Volumen de agregado grueso seco y compactado* con varilla, por volumen unitario de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena.			
	2,40	2,60	2,80	3,00
10 (3/8")	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5 (1/2")	0,59	0,57	0,55	0,53
20 (3/4")	0,66	0,64	0,62	0,60
25 (1")	0,71	0,69	0,67	0,65
40 ()	0,76	0,74	0,72	0,70
50 (2")	0,78	0,76	0,74	0,72
70 (3")	0,81	0,79	0,77	0,75
150 (6")	0,87	0,85	0,83	0,81

* Estos volúmenes están basados en agregados secos y compactados como se describe en la norma A.S.T.M. C29 y fueron seleccionados de resultados empíricos para fabricar hormigones con una trabajabilidad adecuada para la construcción normal. Para hormigones menos trabajables, como por ejemplo los utilizados en pavimentos estos valores pueden aumentarse hasta en un 10%. Para hormigones muy trabajables como los utilizados en bombeo, estos valores pueden reducirse hasta en un 10%.

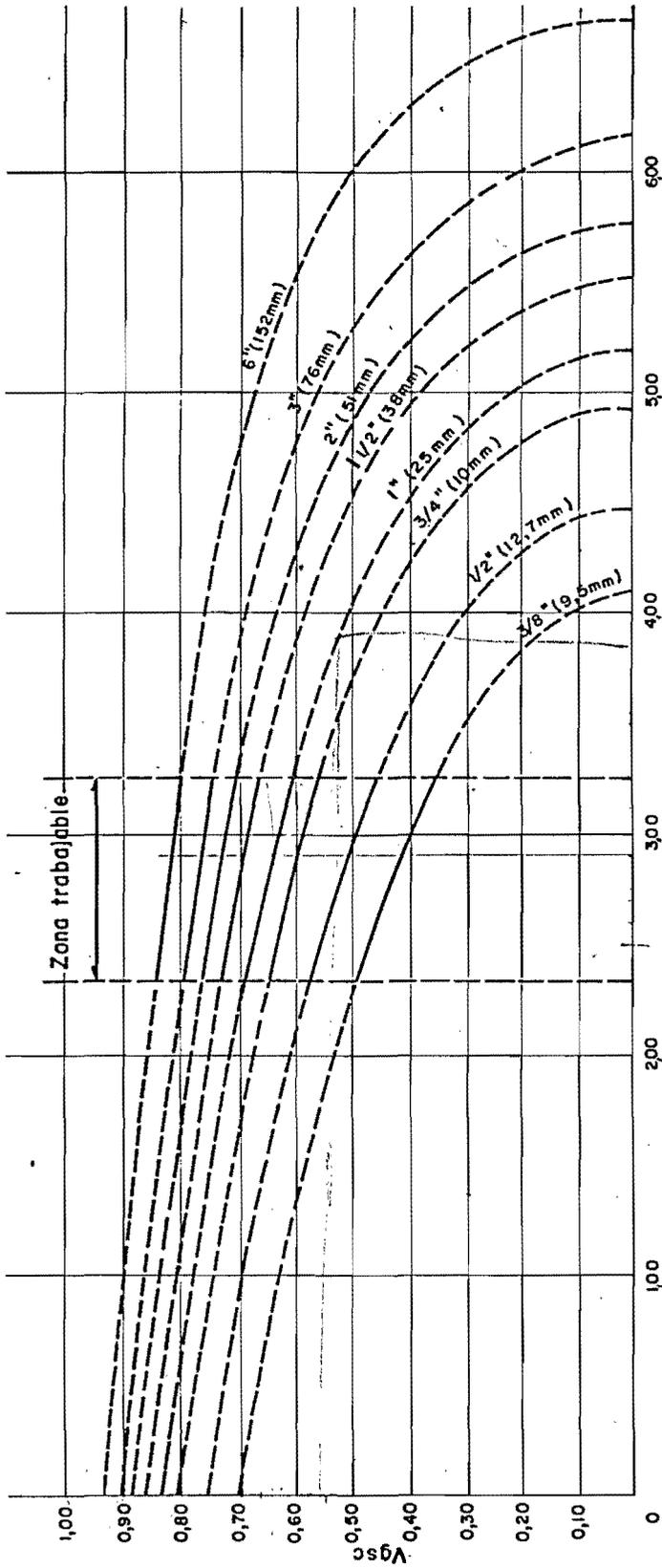
Módulo de finura de la arena: Es la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en las mallas No. 4, 8, 16, 30, 50 y 100, de la A.S.T.M.

Como se puede apreciar en la tabla 10, el A.C.I. recomienda que el módulo de finura de la arena no sea ni menor de 2,3 ni mayor de 3,1; para valores fuera del rango, la tabla no se puede utilizar para hallar el volumen de agregado grueso, ya que el comportamiento de la variable (volumen de agregado grueso) a pesar de ser lineal para módulos de finura entre 2,3 y 3,1 no lo es fuera de este rango. En estos casos se pueden utilizar extrapolaciones especiales como la utilizada por el Ingeniero Argentino Juan Fernando García Baladó, tabla 11 y figura 14⁵/₁₅, hechas sobre bases experimentales muy similares a las utilizadas por los ingenieros norteamericanos.

TABLA 11. Volúmenes de agregado grueso seco y compactado con varilla (Vgsc) por metro cúbico de hormigón (m³). (Según Baladó, Ref. 5).

Tamaño máximo del agregado grueso mm (Pulg.)	Módulo de finura del agregado fino									
	0	1,00	2,00	2,40	2,75	3,10	4,00	5,00	6,00	
10 (3/8)	0,70	0,63	0,54	0,50	0,45	0,39	---	---	---	
12,5 (1/2)	0,74	0,69	0,61	0,57	0,53	0,48	0,30	---	---	
20 (3/4)	0,80	0,75	0,68	0,65	0,62	0,58	0,44	---	---	
25 (1)	0,82	0,78	0,72	0,69	0,66	0,63	0,51	0,21	---	
40 (3/2)	0,85	0,81	0,76	0,73	0,71	0,68	0,59	0,38	---	
50 (2)	0,87	0,83	0,79	0,76	0,74	0,71	0,64	0,47	---	
70 (3)	0,89	0,86	0,82	0,80	0,78	0,76	0,64	0,56	0,21	
150 (6)	0,93	0,91	0,87	0,86	0,84	0,82	0,76	0,66	0,51	

VALORES DEL VOLUMEN COMPACTADO DE AGREGADO GRUESO POR m^3 DE
HORMIGÓN Vgsc EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE FINURA DE LA ARENA



Módulo de finura de la arena

0,65

FIGURA 15. Gráfica de los volúmenes de agregado grueso seco y compactado con varilla (Vgsc), por metro cúbico de hormigón.

Si conocemos el volumen de agregado grueso seco y compactado (V_{gsc}), fácilmente podemos hallar el peso del cascajo seco por metro cúbico de hormigón, multiplicando V_{gsc} por el peso unitario seco y compactado del cascajo obtenido de los ensayos previos a los materiales:

$$G_s = V_{gsc} \times PV_{sc}$$

1-15

1.6.8 Estimación del contenido de agregado fino: (F).

Hasta el paso anterior se ha establecido los pesos de los ingredientes del hormigón con excepción del peso del agregado fino. Para el cálculo del peso de finos (F) por metro cúbico de hormigón se puede utilizar dos procedimientos:

1.6.8.1 Método por peso: este requiere el conocimiento del peso unitario del hormigón fresco, el cual se puede estimar por la experiencia con los materiales, o utilizando como primera aproximación los valores dados en la tabla 12 que son lo suficientemente adecuados para para una determinación inicial de la composición del hormigón. Si se desea un cálculo teórico más exacto se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$U_m = 10 G_a (100 - a) + C \left(1 - \frac{G_a}{G_c}\right) - A(G_a - 1) \quad (1-16)$$

En donde:

- Um: Peso unitario del hormigón fresco (Kgf/m³)
Ga: Promedio de los pesos específicos aparentes saturados de los agregados.
C : Peso de cemento por metro cúbico de hormigón (Kgf)
Gc: Peso específico del cemento (normalmente 3,15)
a : Porcentaje de aire en el hormigón.
A : Peso de agua por metro cúbico de hormigón (Kgf).

TABLA 12. Peso unitario del hormigón fresco.

Tamaño máximo del agreg. mm. (pulg)	Primera estimación del peso del hormigón (Kg/ m ³)	
	Sin aire	Con aire
10 (3/8")	2285	2190
12,5 (1/2)	2315	2235
20 (3/4)	2355	2280
25 (1)	2375	2315
40 (3/2)	2420	2355
50 (2)	2445	2375
70 (3)	2465	2400
150 (6)	2505	2435

Conocido Um, el peso de finos secos será:

$$F_s = U_m - A - C - G_s \quad (\text{Kgf}). \quad (1-17)$$

1.6.8.2 Método por volumen Absoluto: este es el método preferido generalmente, ya que permite obtener la cantidad

de agregado fino (F) por un procedimiento más sencillo que el anterior. Si los volúmenes absolutos de los componentes del hormigón son conocidos. El volumen absoluto del hormigón será:

$$V_H = V_c + V_A + V_a + V_f + V_g \quad (1-12)$$

En donde:

V_c : Volumen absoluto de cemento = $C/\text{Peso específico del cemento}$).

V_A : Volumen absoluto de agua = $A/\text{Peso específico del agua}$.

V_a : Volumen absoluto de aire = (ver tabla 8).

V_f : Volumen absoluto de agreg. finos = $F/\text{Peso específico aparente seco finos}$).

V_g : Volumen absoluto de agreg. gruesos = $G/\text{Peso específico aparente seco gruesos}$).

Generalmente preparamos un metro cúbico de hormigón $V_H = 1\text{m}^3$.

$$1 = \frac{C}{d_c} + \frac{A}{d_A} + V_a + \frac{F_s}{d_f} + \frac{G_s}{d_g}$$

Despejando F que es la incognita tenemos:

$$F_s = d_f \left[1 - \frac{C}{d_c} - \frac{A}{d_A} - V_a - \frac{G_s}{d_g} \right] \quad (\text{Kgf}) \quad (1-19)$$

$F_s d_f$

En donde d_F d_g : Son los pesos específicos aparentes secos de finos y gruesos respectivamente.

d_c d_A : Son los pesos específicos del cemento y el agua; generalmente (3,15 y 1,00 g/cm³).

1.6.9 Proporciones iniciales del hormigón: en este momento conocemos:

C : Peso de cemento por metro cúbico de hormigón

A : Peso de agua por metro cúbico de hormigón.

F_{seca} : Peso de arena seca por metro cúbico de hormigón

G_{seca} : Peso de cascajo seco por metro cúbico de hormigón

Normalmente expresamos las proporciones iniciales por unidad de cemento en peso y en un orden creciente de tamaño así:

$$\frac{A}{C} ; 1 : \frac{F_s}{C} : \frac{G_s}{C} \quad (1-20)$$

que equivale a: $\frac{A}{C}$; 1: f_s : g_s donde: f_s : peso de arena seca por unidad de cemento; g_s : peso de grava seca por unidad de cemento.

1.6.10 Corrección por humedad en los agregados. En los ensayos de laboratorio los agregados generalmente están secos, pero en las obras lo más frecuente es que estén húmedos, en

el primer caso (laboratorio) sólo se corrige la cantidad de agua, pero en el segundo se deben corregir las cantidades de agregados y de agua para la preparación de los hormigones. El control de la humedad de los agregados es obligatorio en la preparación de hormigones de buena calidad ya que de no ser así se va a afectar la relación A/C y a su vez la resistencia del material. Existen métodos normalizados para la determinación de la humedad, y métodos empíricos de amplio uso y con excelentes resultados. De los primeros podemos mencionar: método de secado en horno a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ (A.S.T.M. C-566), método del frasco volumétrico (A.S.T.M. C-70), método por dispersión de Neutrones (A.S.T.M. D-3017), método del Carburo de Calcio (A.A.S.H. T.O. T-142). De los segundos: el método eléctrico, el del alcohol metílico, la sartén o fogón, el volumétrico, etc. Existen publicaciones que tratan extensamente este tema²⁴.

Las proporciones obtenidas en el paso anterior, determinan la cantidad de materiales en peso si los agregados están secos; en el caso más normal, que estén húmedos se harán las siguientes correcciones:

Sean h_{sf} y h_{sg} : las humedades superficiales de los finos y gruesos respectivamente.

h_{af} y h_{ag} : las humedades de absorción de los finos y gruesos respectivamente.

Tenemos entonces:

Caso 1) Agregados húmedos:

(1-21)

$$\text{Peso arena húmeda: } F_h = C \times f_s \times (1 + (h_{tf}/100))$$

$$\text{Peso cascajo húmedo: } G_h = C \times g_s \times (1 + (h_{tg}/100))$$

$$\text{Peso de agua: } A = (C \times \frac{A}{C}) - C \left[\frac{f_s \times h_{sf}}{100} + \frac{g_s \times h_{sg}}{100} \right]$$

En donde: $h_{tf} = h_{sf} + h_{af}$ y $h_{tg} = h_{sg} + h_{ag}$ (humedades totales)

Caso 2) Agregados secos:

$$F_s = C \times f_s$$

$$G_s = C \times g_s$$

(1-22)

$$A = (C \times \frac{A}{C}) + (C \times f_s \times \frac{h_{af}}{100}) + (C \times g_s \times \frac{h_{ag}}{100})$$

Caso 3) Agregados saturados superficialmente secos:

$$F_{sss} = C \times f_s \times (1 + (h_{af}/100))$$

$$G_{sss} = C \times g_s \times (1 + (h_{ag}/100))$$

$$A = (C \times \frac{A}{C})$$

Las fórmulas anteriores permiten hacer las correcciones por humedad de los agregados en cualquier caso. Para explicar ésto es mejor realizar un ejemplo práctico, ya que la utilización de estas fórmulas de corrección es frecuente en trabajos con hormigón.

Ejemplo: en una instalación o planta de mezclas de hormigón se esta dosificando el material con las siguientes proporciones:

	Agua	Cemento	Arena Seca	Cascajo Seco
	185 K _{gf}	350 K _{gf}	860 K _{gf}	975 K _{gf}
Es decir:	0,53 :	1 ;	2,46 ;	2,79

Utilizando una mezcladora de 0,64 m³ de capacidad. Si:

$h_{sf} = 8\%$ y $h_{sg} = 2\%$ calcular los pesos de materiales para una barcada.

$$F_h = 350 \times 2,46 \times (1 + (8/100)) \times 0,64 = 595 \text{ K}_{gf}$$

$$G_h = 350 \times 2,79 \times (1 + (2/100)) \times 0,64 = 637 \text{ K}_{gf}$$

$$A = 350 \times 0,53 - 350 \left[\frac{2,46 \times 8}{100} + \frac{2,79 \times 2}{100} \right] \times 0,64 = 62,14 \text{ K}_{gf}$$

$$C = 350 \times 0,64 = 224 \text{ K}_{gf}$$

Veamos que ocurre si por ejemplo la mezcla se prepara sin efectuar corrección por humedad en los agregados:

Agua aportada por los agregados = $44 \text{ Kg}_f + 12 \text{ Kg}_f = 56 \text{ Kg}_f$

El A/C que usara la mezcla seca:

$$\frac{188,72 + 56}{224} = \frac{174,7}{224} = 0,78$$

El aumento en el A/C sería aproximadamente del 47%, pero esto es más grave aún si se analiza la resistencia.

Con A/C = 0,53 obtenemos una $f'_{cr} = 240 \text{ Kg}_f/\text{cm}^2$ según gráfica de figura 14.

Con A/C = 0,78 " " $f'_{cr} = 130$ " " " "

El descenso en resistencia es del orden del 45%. Estos resultados demuestran como un mal control en la humedad de los agregados se traduce prácticamente en graves problemas de resistencia de la estructura. Por ejemplo en algunas construcciones de nuestro medio, hemos evaluado la resistencia del hormigón en el sitio (con esclerómetro, núcleos, cilindros, etc.) y sorprendentemente se han encontrado resultados muy parecidos a los obtenidos en este ejemplo.

1.6.11 Revisiones y correcciones de las mezclas de prueba.

1.6.11.1 Por asentamiento: se prepara una primera mezcla de prueba para fabricar 0,0063 metros cúbicos de hormigón (o una cantidad mayor si se desea), siguiendo la norma A.S.T.M. C-192. Se mide el asentamiento de la mezcla A.S.T.M. C-143, teniendo en cuenta que se debe utilizar la cantidad de agua necesaria para obtener el asentamiento fijado en el primer paso (1.6.1), considerando que esta puede ser diferente a la calculada en el diseño. Una vez se logre un asentamiento aproximadamente igual al supuesto y la trabajabilidad de la mezcla sea satisfactoria, se determina el rendimiento* y el peso unitario del hormigón (A.S.T.M. C-138, C-179, C-231).

Un método práctico para realizar esta revisión, es ir agregando el agua calculada, gradualmente, observando la trabajabilidad de la mezcla; cuando se juzgue conveniente (a criterio del operador), se mide el asentamiento, si éste es menor que el requerido, se agrega más agua y continúa el proceso hasta obtener un valor más o menos igual al supuesto (se puede aceptar una aproximación de 0,5 cm.). Si el agua agregada produce un asentamiento mayor se puede interpolar para hallar la dosis correcta de agua.

Para hacer la corrección de la mezcla por asentamiento, si

* El rendimiento de una mezcla es el volumen real de materiales utilizados en la preparación del hormigón.

el agua adicionada no fué la calculada, se estima una nueva cantidad de agua de mezclado por metro cúbico de hormigón, dividiendo el contenido neto de agua adicionada a la mezcla (sin tener en cuenta el agua de absorción en los agregados), utilizada para obtener el asentamiento pedido en el diseño, por el rendimiento de la mezcla de prueba usada en m³. finalmente se calculan las nuevas proporciones del hormigón a partir de la sección 1.6.5 del diseño, modificando, si es necesario, el volumen de agregado grueso por m³ de hormigón que aparece en la tabla 10 u 11 o figura 15, para obtener una trabajabilidad adecuada del hormigón.

En resumen el cálculo sería así:

Sean A, C, F_s, G_s, los pesos de materiales para un metro cúbico de hormigón.

Tenemos para la mezcla de prueba:

$$\begin{aligned}
 \text{agua} &= 0.0063 \times A \quad \text{Kg} \\
 \text{cemento} &= 0.0063 \times C \quad \text{"} \\
 \text{arena seca} &= 0.0063 \times F_s \quad \text{"} \\
 \text{Cascajo seco} &= 0.0063 \times G_s \quad \text{"}
 \end{aligned}$$

Llamemos a' = el agua total adicionada a la mezcla para

obtener el asentamiento pedido y P.U. el peso unitario del hormigón preparado medido según el A.S.T.M. C-138.

(1-24)

$$\text{Rendimiento} = R = \frac{\sum (\text{pesos de los componentes utilizados en la mezcla})}{\text{P.U. del hormigón}}$$

Si los agregados están secos:

$$R = \frac{a' - a_{af} - a_{ag} + \text{cemento} + \text{arena} + \text{cascajo}}{\text{P.U.}} \quad (1-25)$$

a_{af} y a_{ag} : Agua absorbida por los finos y los gruesos respectivamente.

Si los agregados están húmedos:

$$R = \frac{a' + a_{sp} + a_{sg} + \text{cemento} + \text{arena} + \text{cascajo}}{\text{P.U.}} \quad (1-26)$$

a_{sf} y a_{sg} : Agua libre o superficial en los finos y los gruesos respectivamente.

La nueva cantidad de agua por metro cúbico de hormigón será A_1 .

Si los agregados están secos $A_1 = (a' - a_{af} - a_{ag})/R$ (1-27)

" " " " húmedos $A_1 = (a' + a_{sp} + a_{sg})/R$.

Como el agua de mezclado por metro cúbico de hormigón varío

($A_1 \neq A$), debemos variar también la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón (C), para mantener constante la relación A/C y no afectar la resistencia del hormigón.

$$C_1 = \frac{A_1}{(A/C)} \text{ se cumple que } \frac{A}{C} = \frac{A_1}{C_1} \quad (1-28)$$

Falta determinar el peso de los agregados F_1 y G_1

Si la trabajabilidad del hormigón preparado fué aceptable, el peso de grava será:

$$G_1 = (\text{Peso cascajo en la mezcla de prueba})/R$$

En caso de no cumplir trabajabilidad, G_1 se puede variar en $\pm 10\%$.

Finalmente, el peso de arena se puede estimar por peso o por volumen absoluto.

a. Por peso:

$$F_1 = P.U - C_1 - A_1 - G_1 \quad (\text{Kgf}) \quad (1-29)$$

b. Por volumen absoluto:

$$F_1 = d_f \left[1 - \frac{C_1}{d_c} - \frac{A_1}{d_A} - v_a - \frac{G_1}{d_g} \right] (\text{Kgf}) \quad (1-30)$$

Las nuevas proporciones del hormigón serán:

$$A_1 : C_1 ; F_1 ; G_1 \quad (1-31)$$

Expresados por unidad de cemento:

$$\frac{A}{C} : 1 ; f_1 ; g_1 \quad (1-32)$$

Que son las nuevas proporciones corregidas por asentamiento.

1.6.11.2 Por resistencia: con las proporciones del hormigón que satisfacen la propiedad de manejabilidad exigida, se prepara una segunda mezcla de prueba para revisión de la resistencia del material. Se pueden fabricar 2, 3, 4, ... n cilindros, lo más normal es fabricar 2 para ensayar a la edad especificada en el diseño de la estructura (generalmente 28 días). El volumen de hormigón a preparar para 2 cilindros es de 0.0125 m³.

Los modelos cilíndricos son fabricados siguiendo la norma A.S.T.M. C-31 y almacenados en condiciones estándar según la norma A.S.T.M. C-192 hasta el día del ensayo. Antes de fallarlos se debe garantizar que la carga aplicada al cilindro esté uniformemente distribuida en el área de aplicación; para ello se deben refrentar las superficies en

contacto con la prensa y según A.S.T.M. C-617; finalmente se ensayan a la compresión simple según norma A.S.T.M. C-39 y determinamos la resistencia del par de cilindros fabricados (f'_{ci}).

Nota: como el ensayo a 28 días es demasiado lento para conocer resultados de la resistencia de la mezcla, en la práctica se han normalizado y utilizado ensayos más rápidos que correlacionados con el de 28 días permiten un control más eficaz de la calidad del hormigón. Existen por ejemplo:

a) El ensayo a 7 días, curado normal. En este los cilindros se almacenan por 7 días a temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ y humedad relativa mayor del 95%. Se fallan y calculamos, con una ecuación de regresión obtenida con datos experimentales analizados estadísticamente, la resistencia probable a los 28 días. En nuestro medio y más propiamente en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Universidad Nacional de Colombia. Se han obtenido las siguientes ecuaciones⁷:

$$f'_{ci} \text{ 28 días} = f'_{ci} \text{ 7 días} + 7,42\sqrt{f'_{ci} \text{ 7 días}} \quad (1970) \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} \quad (1-33)$$

$$f'_{ci} \text{ 28 días} = 0,488f'_{ci} \text{ 7 días} + 12,18\sqrt{f'_{ci} \text{ 7 días}} - 6,384 \quad (1980) \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} \quad (1-34)$$

$$f'_{ci} \text{ 28 días} = 0,239f'_{ci} \text{ 7 días} + 16,65\sqrt{f'_{ci} \text{ 7 días}} - 1,506 \quad (1986) \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} \quad (1-35)$$

Släter en U.S.A. confirmó que la forma general de esta ecuac. es:

$$f'_{c, 28 \text{ días}} = f'_{ci, 7 \text{ días}} + B\sqrt{f'_{ci, 7 \text{ días}}}$$

Recomendamos utilizar la expresión obtenida en 1986.

b) Ensayo a 24 horas, curado acelerado en agua hirviendo: este ensayo es una modificación del procedimiento normalizado en U.S.A. para 28 horas. En este los cilindros se dejan 19 horas en la formaleta, después de vaciados, luego se llevan a un tanque con agua en ebullición y se dejan allí 4 horas, y finalmente se extraen y se fallan a las 24 horas de fabricados. Las correlaciones obtenidas son:

$$f'_{ci, 28d} = 10,55 + 3,2 f'_{ci, 24h} \text{ si } f'_{ci, 24h} \leq 84 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (1970)} \quad (1-36)$$

$$f'_{ci, 28d} = 137,83 + 1,7 f'_{ci, 24h} \text{ si } f'_{ci, 24h} > 84 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (1970)}$$

$$f'_{ci, 28d} = 117,626 + 1,363 f'_{ci, 24h} \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} \text{ (1980)} \quad (1-37)$$

$$f'_{ci, 28d} = 157,575 + 0,928 f'_{ci, 24h} \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} \text{ (1986)} \quad (1-38)$$

Recomendamos utilizar la expresión (1-38).

Una vez conozcamos el $f'_{ci, 28 \text{ días}}$ lo comparamos con el f'_{cr} del paso 1.6.4, si es diferente en más o menos un 5% debemos corregir nuevamente las proporciones del hormigón. El método a seguir es el siguiente: hallamos una nueva rela-

ción agua-cemento basándonos en los resultados obtenidos con el ensayo de resistencia; luego calculamos un nuevo peso de cemento por metro cúbico de hormigón (C_2), manteniendo el peso del agua constante ($A_2 = A_1$); calculamos finalmente el peso de los agregados por metro cúbico, manteniendo constante (si la trabajabilidad es satisfactoria) el peso de cascajo ($G_2 = G_1$). Esto lo podríamos explicar mejor así:

La nueva relación $(A/C)_1$ se halla utilizando la ecuación de la figura 14 (lineal) y manteniendo constante (aproximación) la pendiente de la recta;

$$\text{Si } f'_{cr} = 476 - 443,6 \left(\frac{A}{C}\right) \Rightarrow \left(\frac{A}{C}\right)_1 = \left(\frac{A}{C}\right) - \left(\frac{f_{ci} - f'_{ci} 28 \text{ días}}{443,6}\right) \quad (1-39)$$

$$\text{Por lo tanto: } C_2 = \frac{A_2}{(A/C)_1} \quad \text{con } A_2 = A_1$$

y como $G_2 = G_1$, obtenemos $F_2 = \text{P.U.} - C_2 - A_2 - G_2$ por peso

$$F_2 = \text{df} \left[1 - \frac{C_2}{dc} - A_2 - V_a - \frac{G_2}{dg} \right] \text{ por volumen absoluto. } \quad (1-40)$$

Finalmente el hormigón corregido tendrá las siguientes proporciones:

	Agua	Cemento	Arena	Grava
	A_2	C_2	F_2	G_2
Es decir	$\left(\frac{A}{C}\right)_1$	1	f_2	g_2 (1-41)

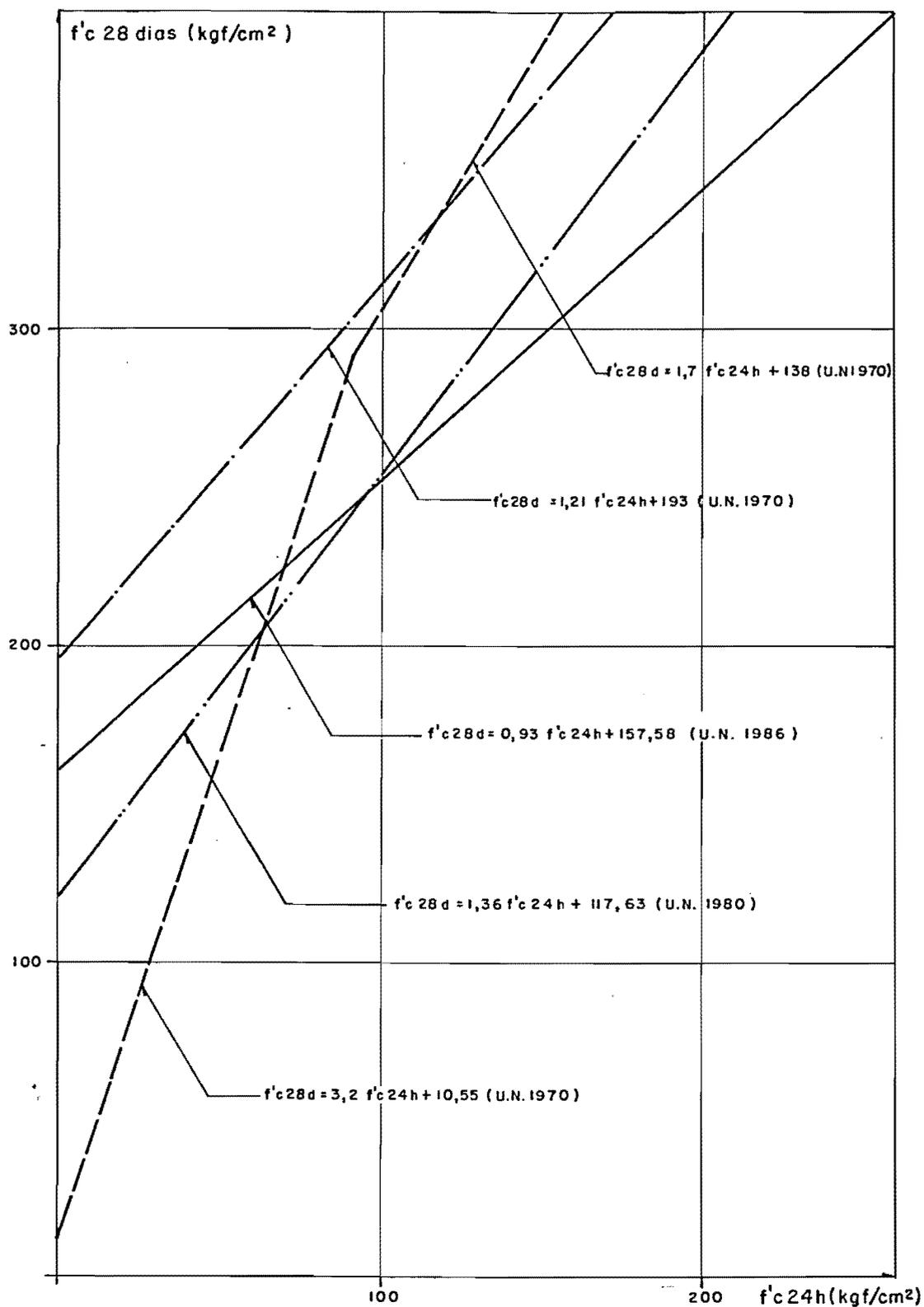


FIGURA 16 Curvas de correlación entre la resistencia a la compresión del hormigón curado acelerado 24h y la de 28 días curado normal.

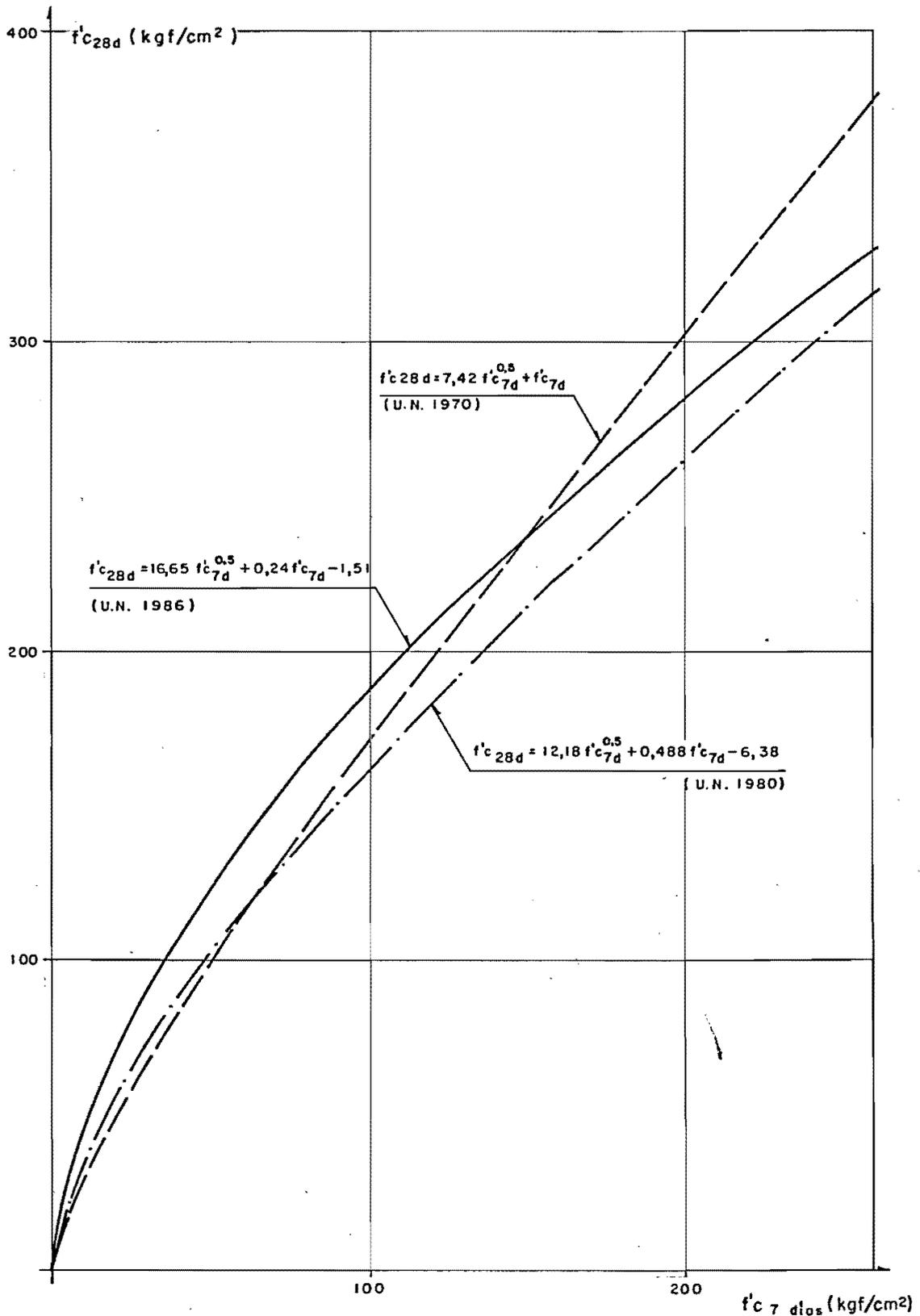


FIGURA 17 Curvas de correlación entre la resistencia a la compresión del hormigón a 7 días con 28 días curado normal.

Con estas proporciones, nuevamente se revisa la resistencia y se hacen las correcciones necesarias repitiendo este último procedimiento hasta lograr cumplir la resistencia f'_{cr} del hormigón.

Nota: en muchos casos para lograr cumplir con el f'_{cr} se tiene que sacrificar la trabajabilidad de la mezcla; para evitar ésto se debe utilizar aditivos que mejoren la plasticidad del hormigón sin afectar la resistencia (fluidificantes y superfluidificantes).

1.7. Ejemplo de diseño:

Diseñar una mezcla de hormigón para las columnas de un edificio localizado en una zona donde no existen problemas de durabilidad. La resistencia requerida en los planos estructurales es de $f'_{c} = 246 \text{ Kg/cm}^2$ y la firma constructora ha encontrado estadísticamente que este hormigón se puede fabricar con una desviación típica σ_n , de 27 Kg/cm^2 (obtenida de más de 30 ensayos).

Los materiales a utilizar tienen las siguientes propiedades:

1.7.1 El cemento: es un pórtland tipo I con un peso específico de 3,15 y cumple con las especificaciones A.S.T.M. C-150 (Icontec 121 y 321).

1.7.2 El agregado fino: es un agregado aluvial, que se ajusta a las especificaciones A.S.T.M. C-33 (Icontec 174).
Sus propiedades físicas son:

Módulo de finura = 2,70

Peso específico aparente saturado = 2,65

Humedad de absorción = 1,3%

1.7.3 El agregado grueso: de tipo aluvial, se ajusta a las especificaciones A.S.T.M. C-33, Icontec 174, sus propiedades físicas son:

Tamaño máximo = 20 mm (3/4")

Peso específico aparente saturado = 2,70

Humedad de absorción = 1,0%

Peso unitario seco y compactado = 1,60 gf/cm³

Procedimiento de diseño:

1. El asentamiento para este tipo de estructura y para hormigón compactado con vibración según la tabla 7 es de 5 cm. a 9 cm. Asumiremos inicialmente 5 cm., por economía.

S = 5 cm.

2. El tamaño máximo seleccionado es de 20 mm (3/4")

TM = 20 mm.

3. El contenido de agua por metro cúbico de hormigón para un $S = 5$ cm. y un $TM = 20$ mm. y hormigón sin aire incluido según la tabla 8 es: $A = 185$ Kgf. y el contenido de aire es el 2% del volumen total.

4. La resistencia de diseño de la mezcla f'_{cr} para un $f'_{c} = 246$ Kgf/cm² y un $\sigma_n = 27$ Kgf/cm² se puede obtener de la figura 13: $f'_{cr} = 289$ Kgf/cm².

5. La relación agua-cemento por resistencia para un $f'_{cr} = 289$ Kgf/cm², según la figura 14 (curva de la U.N. 1986) es de $\frac{A}{C} = 0,42$ en peso.

El (A/C) por durabilidad no se controla en este diseño.

6. El contenido inicial de cemento será: $C = \frac{185}{0,42} = 440,5$ Kgf por metro cúbico de hormigón.

7. Para hallar el contenido de agregado grueso por metro cúbico de hormigón, con los valores del módulo de finura del agregado fino $MF = 2,70$, y el tamaño máximo del agregado, $TM = 20$ mm (3/4"), vamos a la tabla 10 y hallamos el volumen de agregado grueso seco y compactado con varilla por metro cúbico de hormigón: $V_{gsc} = 0,63$ m³.

El peso de agregado grueso seco por metro cúbico de hormi-

gón: $G_s = 0,63 \text{ m}^3 \times 1600 \text{ Kg/m}^3 = 1008 \text{ Kg}$ y saturado superficialmente seco $G_{sss} = 1008 \text{ Kg} \times 1,01 = 1018 \text{ Kg}$.

8. El contenido de agregado fino se determina por peso o por volumen absoluto:

a) Por peso: ya sea de la tabla 12 o de la ecuación determinamos el peso unitario del hormigón fresco $U_m = 2355 \text{ Kg/m}^3$ de tabla o $U_m = 2381 \text{ Kg/m}^3$ de ecuación conocido el $U_m \Rightarrow$ El peso de agregado fino sss por metro cúbico de hormigón, F_{sss} será:

$$F_{sss} = 2381 \text{ Kg} - 440,5 \text{ Kg} - 185 \text{ Kg} - 1018 \text{ Kg} = 738 \text{ Kg}$$

$$\text{y } F_s = 738 \text{ Kg} / 1,013 = 729 \text{ Kg}$$

b) Por volúmenes absolutos: este es el método más utilizado;

$$\text{Volumen absoluto de agua} = \frac{185 \text{ Kg}}{1000 \text{ Kg/m}^3} = 0,185 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen absoluto de cemento} = \frac{440,5 \text{ Kg}}{3150 \text{ Kg/m}^3} = 0,140 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen absoluto de agregado grueso} = \frac{1018 \text{ Kg}}{2700 \text{ Kg/m}^3} = 0,377 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire} = \frac{2}{100} \times 1 \text{ m}^3 = 0,02 \text{ m}^3 \text{ ahora de la Ec. 1 - 19.}$$

$$F_{SSS} = 2650 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}^3} [1 - 0,140 - 0,185 - 0,02 - 0,377] = 737\text{Kgf}$$

$$y \quad F_s = 737 \text{ Kgf}/1,013 = 727,5 \text{ Kgf}$$

En resumen tenemos: $F_s = 727,5$

Material	Pesos (Kgf)	
	Volumen	Peso
Cemento	440,5	440,5
Agua	185	185
Agreg. grueso seco	1008	1008
" fino seco	727,5	729

Por ambos métodos se obtienen resultados aproximadamente iguales. Para propósitos de diseño es más práctico trabajar con el método de los volúmenes absolutos, ya que permite seguir de una manera más sencilla y clara la dosificación del hormigón.

9. Las proporciones iniciales siempre se expresan por unidad de cemento y en el siguiente orden:

Agua	Cemento	Agreg. finos (Secos)	Agreg. Gruesos (Secos)
185 Kgf	440,5 Kgf	727,5 Kgf	1008 Kgf
0,42 ;	1 :	1.65 :	2,29

Con las proporciones obtenidas vamos a preparar inicialmente una mezcla de prueba para verificar si cumple con el asentamiento supuesto en el paso 1. Pero se debe observar si los agregados están secos o húmedos para obtener los pesos correctos de los materiales para el hormigón.

10. Corrección por humedad: vamos a suponer que los agregados están húmedos; sean:

$$\text{htf} = \text{humedad total agreg. fino} = 5,5\% \quad \text{hsf: humedad superficial finos} = 5,5 - 1,3 = 4,2\%$$

$$\text{htg} = \text{humedad total agreg. grueso} = 2,5\% \quad \text{hsg: humedad superficial gruesos} = 2,5 - 1,0 = 1,5\%$$

$$F_h = 440,5 \times 1,65(1 + 0,055) = 766,8 \text{ Kg} \approx 767 \text{ Kg}$$

$$G_h = 440,5 \times 2,29(1 + 0,025) = 1033,96 \text{ Kg} \approx 1034 \text{ Kg}$$

$$A = 440,5 \times 0,42 - 440,5((1,65 \times 4,2/100) + (2,29 \times 1,5/100)) = 185 - 45,6 = 139 \text{ Kg}$$

Los pesos húmedos por metro cúbico de hormigón serán:

Agua	Cemento	Agreg. finos (húmedos)	Agreg. Gruesos (húmedos)
139 Kg	440,5 Kg	767 Kg	1034 Kg

11. Revisión del asentamiento y corrección:

Para esta revisión debemos preparar un volumen de 0,0063 m³ de hormigón. Los materiales a pesar serán:

$$\begin{aligned}
 \text{agua} &= 0,0063 \text{ m}^3 \times 139 \text{ Kg} = 0,876 \text{ Kg} = 876 \text{ gf} \\
 \text{cemento} &= 0,0063 \text{ m}^3 \times 440,5 \text{ Kg} = 2,772 \text{ Kg} = 2772 \text{ gf} \\
 \text{Ag. finos húmedos} &= 0,0063 \text{ m}^3 \times 767 \text{ Kg} = 4,832 \text{ Kg} = 4832 \text{ gf} \\
 \text{" gruesos " } &= 0,0063 \text{ m}^3 \times 1034 \text{ Kg} = 6,514 \text{ Kg} = 6514 \text{ gf}
 \end{aligned}$$

Al preparar esta mezcla fué necesario agregar un total de 1176 gf de agua y el asentamiento obtenido fué de 5 cm. el peso unitario del hormigón fué de 2356 Kg/m³ y el % de aire del 1%.

Para corregir la mezcla calculemos el rendimiento R:

$$R = \frac{1176}{(2276 \text{gf} + 2772 \text{gf} + 4832 \text{gf} + 6514 \text{gf}) / 2,356 \text{gf/cm}^3} = 6491,5 \text{cm}^3 = 0,0065 \text{m}^3$$

$$\text{Agua aportada por el agregado fino} = 4832 - 0,0063 \times 738 \times 1000 = 189$$

$$\text{Agua aportada por el agregado grueso} = 6514 - 0,0063 \times 1018 \times 1000 = 101$$

El contenido de agua de mezclado fué: 1176gf + 189gf (Agregado fino) + 101 gf (Agregado grueso) = 1466 gf.

La nueva cantidad de agua por metro cúbico de hormigón es

$$A_1 = \frac{1,466 \text{ Kg}}{0,0065} = 225,5 \text{ Kg}$$

La nueva cantidad de cemento por m³ de hormigón es:

$$\frac{225,5}{0,42} = 537 \text{ Kg} \text{ es claro que la mezcla no debe variar la}$$

relación A/C, para no modificar la resistencia.

Como la trabajabilidad de la mezcla fué satisfactoria el contenido de agregado grueso lo mantendremos constante

$$G_{1h} = \frac{6,514 \text{ Kg} \cdot \text{Ag. grueso} \cdot 0,10005}{0,0065R} = 1002,15 \text{ Kg}(\text{húmedos})$$

$$G_{1s} = 1002,15/1,025 = 978 \text{ Kg}(\text{secos})$$

$$y \quad G_{1sss} = 978 \cdot 1,01 = 987 \text{ Kg}(\text{S.S.S.})$$

finalmente el peso de agreg. finos es:

$$F_{1sss} = 2356 \text{ Kg} - 225,5 - 537 - 987 = 606,5 \text{ Kg}$$

$$y \quad F_{1s} = 606,5 \text{ Kg}/1,013 = 599 \text{ Kg}(\text{secos}).$$

también podemos determinar F_1 por el método de los volúmenes absolutos así:

$$F_{1sss} = 2,650 \left[1 - \frac{536}{3150} - \frac{225,5}{1000} - 0,01 - \frac{987}{1700} \right] = 606,3 \text{ Kg}; F_{1s} = 599 \text{ Kg}$$

Los pesos corregidos por asentamiento son:

Agua	Cemento	Agreg. Finos (secos)	Agreg. Gruesos (secos)
$\frac{725,5}{1125,5} \text{ Kg}$	$\frac{537}{536} \text{ Kg}$	599 Kg	978 Kg
0,42 ;	1 ;	1,12 ;	1,82

12. Revisión de resistencia y corrección: para este segundo ensayo vamos a suponer que los agregados están secos es decir $htf = htg = 0\%$. Con las proporciones corregidas en 11 vamos a fabricar dos cilindros de prueba que requieren $0,0125 \text{ m}^3$ de mezcla:

12.5 Kt

$$\text{Cemento} = 0,0125 \text{ m}^3 * 536 \text{ Kg} = 6,7 \text{ Kg} = 6700 \text{ gf}$$

$$\text{Agreg. fino seco} = 6700 \text{ gf} * 1,12 = 7504 \text{ gf}$$

$$\text{Agreg. grueso seco} = 6700 \text{ gf} * 1,82 = 12194 \text{ gf}$$

$$\text{Agua} = 6700 \text{ gf} * (0,42 + 1,12 * 1,3/100 + 1,82 * 1,0/100) = 3033,5 \text{ gf}$$

Los dos cilindros se fallaron a 28 días obteniéndose una resistencia promedio de $f'_{ci} = 324 \text{ Kg/cm}^2$ (en los casos prácticos se pueden fallar a 24 horas con curado acelerado o a 7 días con curado normal y con las ecuaciones (3) del numeral 1.6.11.2 se hallan las resistencias probables a 28 días). Como $f'_{ci} > f'_{cr} = 289 \text{ Kg/cm}^2$ el diseño es antieconómico, y debemos corregir nuevamente las proporciones utilizadas en esta revisión:

hallemos una nueva relación agua-cemento: $(A/C)_1$

$$\underset{0,52}{(A/C)_1} = 0,42 - \left(\frac{289 - 324}{443,6} \right) = 0,50 \quad \text{--- } 0,02 > =$$

El contenido de cemento es: $C_2 = \frac{225,5}{0,50} = 451 \text{ Kg}$.

El agregado grueso: $G_2 = 978 \text{ Kgf}(\text{seco})$ y $G_{2\text{sss}} = 987 \text{ Kgf}$

$$F_{2\text{sss}} = 2356 - 225,5 - 451 - 987 = 692,5 \text{ Kgf} \quad \text{y}$$

$$F_{2s} = 684 \text{ Kgf}(\text{seco})$$

$$o \quad F_{2\text{sss}} = 2650 \left[1 - \frac{451}{3150} - \frac{225,5}{1000} - 0,01 - \frac{987}{2700} \right] = 678 \text{ Kgf}$$

$$\text{y } F_{2s} = 669 \text{ Kgf}(\text{seco}).$$

Los pesos corregidos por resistencia son:

Agua	Cemento	Agreg. Finos (secos)	Agreg. Gruesos (Secos)
225,5 Kgf	451 Kgf	669 Kgf	978 Kgf
0,50 ;	1 :	1,48 :	2,17

Con estas proporciones se debe verificar nuevamente la resistencia de la mezcla y efectuar las correcciones necesarias. Si por ejemplo, la resistencia obtenida con estas proporciones es de $f'_{ci} = 250 \text{ Kgf/cm}^2$, podemos hallar, basados en los dos resultados de resistencia, una nueva ecuación lineal para los materiales de que disponemos así:

$$f'_{cr} - 250 = \left(\frac{324 - 250}{0,42 - 0,50} \right) (A/C - 0,50)$$

$$f'_{cr} = 712,5 - 925 (A/C)$$

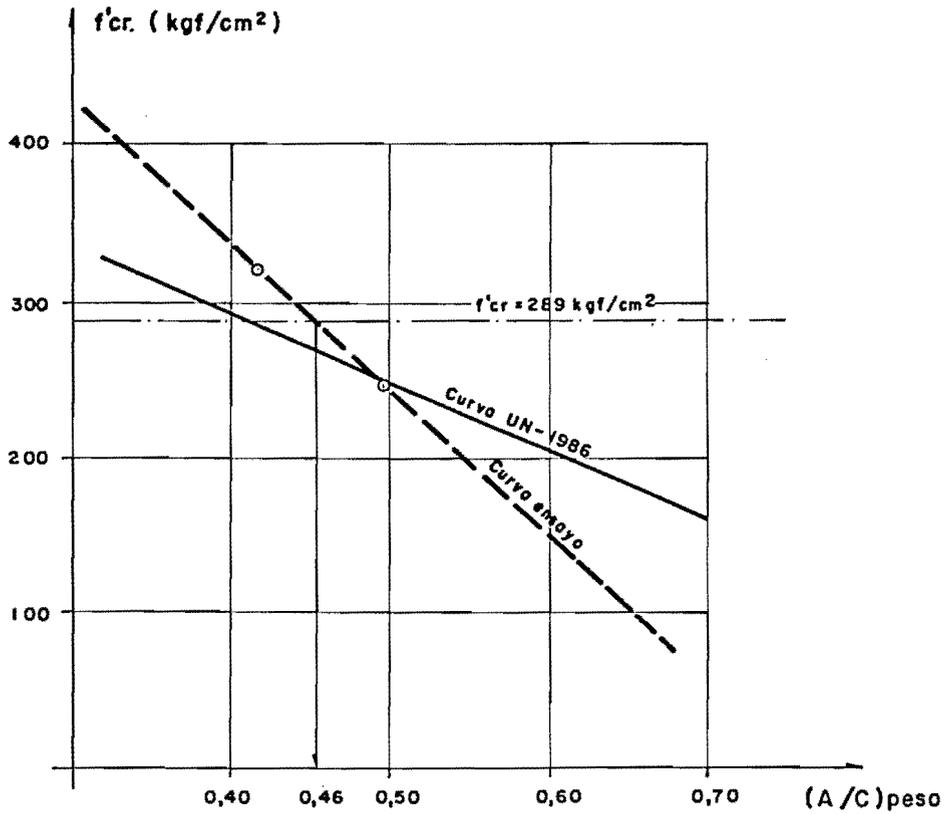


FIGURA 18. Determinación gráfica (A/C) modificada.

∴ Para un $f'_{cr} = 289 \text{ Kgf/cm}^2$, según la nueva recta (A/C) = 0,46

$$\text{Tenemos } = C_3 = \frac{225,5}{0,46} = 490 \text{ Kgf}$$

$$G_{3sss} = 987 \text{ Kgf} \quad \text{y} \quad G_{3s} = 978 \text{ Kgf}$$

$$F_{3sss} = 2356 - 225,5 - 490 - 987 = 653,5 \text{ Kgf} \quad \text{y}$$

$$F_{3s} = 645 \text{ Kgf}$$

$$6 \quad F_{3sss} = 2650 \left[1 - \frac{490}{3150} - \frac{225,5}{1000} - 0,01 - \frac{978}{1700} \right] = 653,5 \text{Kgf}$$

$$y \quad F_{3s} = 645 \text{ Kgf}$$

Los nuevos pesos corregidos serán:

Agua	Cemento	Agreg. Fino (Seco)	Agreg. Grueso (Seco)
225,5 Kgf	490 Kgf	645 Kgf	978 Kgf
0,46 ;	1 :	1,32 :	2,00

Esta mezcla se chequea nuevamente si la $f'_{ci} = f'_{cr} \pm 0,05 f'_{cr}$ (274 - 303 Kgf/cm²); el diseño termina; en caso contrario se debe hacer otra corrección, similar a la última y verificar la resistencia del hormigón. El % de error del 5% se ha venido utilizando por nosotros en los diseños de mezclas con resultados satisfactorios; esa es la razón por la cual recomendamos ese valor.

Nota: por lo general dos tanteos por resistencia son suficientes en la mayoría de los casos. Si una mezcla requiere menos de 0,30 de A/C se deben utilizar otros materiales o ensayar aditivos para mejorar la calidad del hormigón.

1.8 Mezclas para obras pequeñas¹: cuando no se justifique

económicamente el diseño de una mezcla de hormigón, porque la obra es pequeña y no se especifican condiciones mínimas para el material, se pueden utilizar dosificaciones establecidas empíricamente, que suministran buenos resultados siempre y cuando los materiales para la fabricación del hormigón cumplan las normas. La tabla 13 suministra las proporciones aproximadas para la dosificación de hormigones resistentes y durables siempre y cuando la cantidad de agua adicionada a la mezcla no sea excesiva.

TABLA 13. Proporciones del hormigón para obras pequeñas¹.

Pesos aproximados de los componentes del hormigón en Kgf.

Hormigón sin aire incluido

Tamaño Máximo Mezcla	Cemento	Agreg. Fino	Agreg. Grueso	Agua	
10 mm (3/8")	A	400	875	840	200
	B	400	830	880	200
	C	400	790	930	200
20 mm (3/4")	A	380	835	950	190
	B	380	790	1000	190
	C	380	740	1050	190
25 mm (1")	A	370	800	1030	185
	B	370	750	1080	185
	C	370	690	1140	185
40 mm (3/2")	A	335	810	1110	170
	B	335	750	1170	170
	C	335	695	1225	170
50 mm (2")	A	320	830	1140	160
	B	320	770	1200	160
	C	320	710	1260	160

Como se puede ver en la tabla 13, para cada tamaño máximo

de agregado se proporcionan tres mezclas; inicialmente se debe usar la mezcla B, si ésta da con exceso de agregado fino se debe ensayar la mezcla C, en caso contrario la mezcla A. Los valores dados en la tabla 13 se utilizan con agregados saturados superficialmente secos; si los agregados están secos o húmedos se deben hacer las correcciones ya explicadas.

A estas mezclas no se les puede exigir que cumplan los requisitos de resistencia explicados en 1.4.2.

```

100 CLEAR :CLS
105 REM**PROGRAMA ELABORADO POR ORLAND
O GIRALDO BOLIVAR.1987
110 PRINT "*DISEÑO MEZCLAS ACI*";
128 PRINT " *DATOS MATERIALES*"
130 INPUT "Modulo finura=";Q
140 INPUT "Densidad finos.sss=";A1
150 INPUT "absorcion=";B1
165 INPUT "Tamano maximo puls.=";D
170 INPUT "Densidad gruesos.sss=";W
180 INPUT "absorcion=";E
190 INPUT "P.U.compact.=";X
210 PRINT "DATOS OBRA Y CONST. "
222 PRINT "Conoce la A/C:";:INPUT CL$
224 IF CL$="NO" THEN 228
226 INPUT "A/C=";P;GOTO 250
228 INPUT "Max.a/c.durab. 0.45-0.50-0.
60=";L
230 INPUT "fc^(Ksf/cm2)=";N
232 INPUT "Criterio utilizado: DT o
CU=";CH$; IF CH$="CU" THEN 240
233 GOSUB 1700
237 GOTO 250
240 INPUT "Coef.varia.=";U
250 INPUT "Asentamiento=";B
260 IF D=1/2 THEN 350
270 IF D=3/4 THEN 410
280 H=157.14+16.97*LOG(B)
290 IF D=1 THEN 470
300 IF D=3/2 THEN 520
310 IF D=2 THEN 580
320 IF D=2.5 THEN 640
330 IF D=3 THEN 700
340 GOTO 128
350 H=192.48+2.32*B
360 C=2.5
400 GOTO 720
410 H=166.05*(B^.088)
420 C=2.0
460 GOTO 720
470 C=1.5
510 GOTO 720
520 H=H-17
530 C=1.0
570 GOTO 720

```

```

580 H=H-25
590 C=0.50
630 GOTO 720
640 H=H-30
650 C=0.4
690 GOTO 720
700 H=H-35
710 C=0.30
720 IF CL$="SI" THEN 1000
730 IF CH$="DT" THEN 820
780 I=(N-35)/(1-.02326*U)
790 J=N/(1-0.01343*U)
810 IF I>J THEN R=I ELSE R=J
820 INPUT "A/C por:ACI(A).Tesis/86(T).
Solins(S):";U$
830 IF U$="A" THEN 970
840 IF U$="S" THEN 976
850 P=(476.14-R)/443.58
860 GOTO 980
970 P=LOG(1224/R)/LOG(13.46):IF P>0.30
THEN 980
972 PRINT "A/C<0.30; SDLINGRAL (SI/NO)
:"::INPUT N$
974 IF N$="NO" THEN 978
976 P=LOG(985/R)/LOG(14.3):GOTO 980
978 P=0.30
980 IF L>P THEN 1000
990 P=L
1000 IF Q>3.3 THEN GOTO 2000
1001 IF D=0.5 THEN S=0.83-0.10*Q
1002 IF D=0.75 THEN S=0.90-0.1*Q
1004 IF D=1 THEN S=0.95-0.1*Q
1006 IF D=1.5 THEN S=1.0-0.1*Q
1008 IF D=2.0 THEN S=1.02-0.1*Q
1010 INPUT "Bombeo.Normal(b/n)";K$:IF K
$="N" THEN 1020
1015 S=0.90*S
1020 A2=H/P
1030 A3=S*X*1000*(1+E/100)
1040 G=1000-0.318*A2-H-C*10-A3/W:T=A3:0
=G*A1
1045 INPUT "Impresora(s/n)";I$:IF I$="
N" THEN 1051
1050 LPRINT " MEZCLAS PARA Fc^=";N:"
K$ f/cm^2 ";K$:LPRINT
1051 M=0

```

```

1052 PRINT " A C F G":PRINT "
K9 k9 K9.sss"
1053 PRINT USING"#####";H;A2;0;T::PRINT
CHR$(37);" aire=";C::INPUT "";CH$
1055 PU=H+A2+T+0:PRINT "PU.suma="::PRIN
T USING"#####";PU:" K9/m3"
1056 IF M<>0 THEN 1090
1058 PH=10*(A1+W)/2*(100-C)+A2*(1-((A1+
W)/2)/3.15)-H*((A1+W)/2-1)
1060 PRINT "PU.form="::PRINT USING"####
#";PH;" K9/m3":INPUT "OK";CH$
1065 IF I$="N" THEN 1090
1070 LPRINT "PROPORC.POR PESO";
1090 U=0/(A2*(1+B1/100))
1100 Y=T/(A2*(1+E/100))
1110 IF I$="S" THEN 1210
1120 PRINT USING"#.##";P;TAB(5);"1";TAB
(8);U;TAB(14);Y
1130 BEEP :INPUT "OK";CH$
1140 GOTO 1230
1210 LPRINT USING"###.##";P;TAB(24);"1"
;TAB(26);U;TAB(31);Y
1230 PRINT "ENTRE HUMEDAD TOTAL"
1240 INPUT "Arena =";A6:INPUT "Cascajo=
";A7
1250 IF M=0 THEN Y8=0.0063 ELSE Y8=0.01
25
1255 F=Y8*A2*1000
1260 A8=Y8*0*(1+A6/100)*1000
1270 A9=Y8*T*(1+A7/100)*1000
1280 Z=F*(P-(U*(A6-B1)+Y*(A7-E))/100)
1290 H=P*A2
1300 PRINT " Agua: Cemento: "
1345 PRINT USING"#####";Z;
1346 PRINT USING"#####";F;
1347 PRINT " Arena: Cascajo:";
1348 PRINT USING"#####";A8;
1349 PRINT USING"#####";A9::INPUT
" ";CH$
1350 IF M=0 THEN 1380
1360 IF M=1 THEN 1490
1380 INPUT "Tot.agua ast=";B6:INPUT "De
ns.horm=";DH
1385 INPUT "Asent.obten=";SD
1395 Z1=(B6/1000+(A6-B1)*0*Y8/100+(A7-E
)*T*Y8/100)*1000

```

```

1405 B8=(Z1+A8+A9+F)/(1000*DH):PRINT "R
endimien=":PRINT USING"#.#####";B8
1407 INPUT "Rend(0.0063)=":B8
1415 B9=Z1/(1000*B8):IF S0=B THEN 1416
ELSE B9=B9+(B-S0)*2
1416 B5=B9/P:CA=(1+E/100)*A9/(B8*1000*(
1+A7/100))
1417 INPUT "Desea variar grava":L$:IF L
$="N" THEN 1419
1418 INPUT "> 0 <":K$:IF K$=">" THEN CA
=S*1.10*1000*X ELSE CA=S*0.90*1000*X
1419 G=(DH-B9-CA-B5):H5=G
1430 T=CA
1440 O=H5
1450 A2=B5:H=B9
1460 IF I$="S" THEN 1470
1465 PRINT "PROP.AJUSTADAS":GOTO 1480
1470 LPRINT "AJUST.POR.ASENT. ";
1480 M=M+1:GOTO 1052
1490 INPUT "Resist.obtenida.ksf/cm2":B2
1492 C5=(B2-R)*100/R:IF ABSC5<=10 THEN
1494 ELSE 1500
1494 PRINT "No Reaj.Error=":PRINT USIN
G"###.##":C5
1495 INPUT "Deseo reaj.(S/N):":H$
1496 IF H$="N" THEN END
1500 IF U$="A" THEN 1505
1502 IF U$="T" THEN 1508
1504 INPUT "p/C.aj.Selins.=":A4
1505 A4=(P+(R-B2)/(-533.33)):IF A4<0.3
THEN 1610 ELSE 1510
1508 A4=(P+(R-B2)/(-443.58))
1510 A5=B9/A4
1520 B3=DH-B9-A5-CA
1530 B4=B3
1540 O=B4
1550 T=CA
1560 A2=A5
1570 H=B9:P=A4
1580 IF I$="S" THEN 1590
1585 PRINT "PROP.REAJUST.":GOTO 1600
1590 LPRINT "REAJ.POR.RESIST. ";
1600 GOTO 1052
1610 INPUT "A/C<0.30:REDISENE(1),USE AD
ITIVOS(2)":H1
1620 IF H1=2 THEN 260 ELSE 100

```

```

1700 INPUT "Conoce desviac.=";H$
1710 IF H$="NO" THEN 1900
1720 INPUT "#muestras=";N7
1730 INPUT "Desviacion=";DS
1740 IF N7<30 THEN 1800
1750 I=N-35+2.33*DS
1760 J=N+1.34*DS
1770 IF I>J THEN 1790
1780 R=J:RETURN
1790 R=I:RETURN
1800 IF N<15 THEN 1900
1810 K3=1.30-0.01*N7
1820 DS=DS*K3
1830 GOTO 1750
1900 IF N>210 THEN 1920
1910 R=N+70:RETURN
1920 IF N>350 THEN 1940
1930 R=N+84:RETURN
1940 R=N+98:RETURN
2000 IF D=0.75 THEN S=-1.385+1.096*Q-0.
160*Q^2:GOTO 1010
2010 IF D=1 THEN S=-2.01+1.36*Q-0.183*Q
^2:GOTO 1010
2020 IF D=1.5 THEN S=-3.38+1.93*Q-0.236
*Q^2:GOTO 1010
2030 IF D=2 THEN S=-2.89+1.69*Q-0.203*Q
^2:GOTO 1010

```

2. Método A.C.I. 211.1 para hormigón con adición de cenizas volantes¹.

2.1 Introducción: se denomina cenizas volantes al residuo procedente de la combustión del carbón pulverizado en las centrales térmicas. Este residuo está constituido de partículas muy finas que salen de la caldera junto con los gases quemados y son recogidos mediante precipitadores electrostáticos o colectores mecánicos²⁵.

La existencia de millones de toneladas de este producto cuya acumulación y almacenamiento era verdaderamente un gran problema, fué la causa principal para que se planteara la reutilización del material. Fué así como en 1930 algunos laboratorios de los Estados Unidos iniciaron una serie de estudios sobre la posibilidad de incorporar estos materiales al cemento. En 1939 se realizó un revestimiento vial en Chicago con un cemento adicionado con cenizas volantes. En 1952 inaugurada la Presa Hungry Horse sobre el río Flathhead en Montana. Esta obra fué construída con un aglomerante que contenía 70% de cemento y 30% de cenizas para el hormigón interior y 25% de cenizas para el hormigón super-

ficial. La construcción de la estructura absorbió más de 140.000 toneladas de cenizas. Otra presa, la de Baltimore Liberty, situada sobre el río Patapsco utilizó más de 8.000 toneladas de cenizas en una proporción del 25% en peso. En todas estas obras las cenizas se agregaron al cemento antes de preparar las mezclas de hormigón. La tendencia actual es incorporar en la fabricación de los cementos un porcentaje de cenizas del 10% al 20% en el momento de la trituración de clínker. Se obtienen, así, mezclas homogéneas en las cuales la ceniza es triturada hasta alcanzar una finura suficiente para presentar propiedades puzolánicas. Esto permite una economía en el costo del cemento²⁵.

2.2 Características principales de las cenizas volantes en el hormigón²⁵.

De la amplia utilización de las cenizas volantes, como aditivo mineral, finamente dividido, en el hormigón, se pueden enumerar, aunque cualitativamente, algunas propiedades importantes. Por ejemplo, se ha reconocido experimentalmente que las cenizas volantes pueden afectar la resistencia del hormigón de las siguientes maneras: a) por reacción puzolánica. b) por reducción de agua en la mezcla de hormigón, manteniendo una manejabilidad constante; c) por aumento del volumen de pasta en la mezcla. Estos y otros efectos

adicionales demuestran que la adición de cenizas complica aún más la naturaleza compleja del hormigón. Algunas conclusiones de conocimiento general son las siguientes:

- a) Las cenizas volantes, de diferentes fábricas, pueden tener un comportamiento muy diferente en el hormigón aunque ellas cumplan las especificaciones A.S.T.M. C-618.
- b) La misma ceniza puede tener un comportamiento diferente con los distintos cementos portland o inclusive con un mismo cemento portland pero que provenga de diferentes fábricas.
- c) El efecto de las cenizas volantes puede variar con la edad del hormigón. A edades tempranas la resistencia se reduce, pero a edades de 90 días, o más, la resistencia aumenta notablemente.
- d) La ceniza volante puede tener un efecto apreciable en la cantidad de aire incluido.
- e) El hormigón hecho con cenizas volantes es más sensible a las condiciones de curado (humedad y temperatura) que el mismo hormigón de cemento portland.
- f) La calidad de la ceniza volante debe mejorar a medida que al hormigón se le exijan mayores resistencias.

Es obvio entonces, que el procedimiento antes explicado para la dosificación de mezclas de hormigón debe ser modificado cuando el hormigón se le adicionan cenizas volantes.

Desafortunadamente nuestro conocimiento es limitado, cuando se trata de evaluar cuantitativamente el efecto de las

cenizas volantes en el hormigón. En nuestro medio existe muy poca investigación sobre este tema. Sin embargo se puede encontrar una amplia información experimental en publicaciones de organismos internacionales tales como: A. C. I., U. S. B. R., P. C. A., RILEM, CEB, etc. que permiten obtener algunas fórmulas empíricas simples para el diseño de mezclas de hormigón con cenizas volantes. Se debe resaltar aquí que estas fórmulas tienen validez limitada y en ningún momento eliminan la necesidad de preparar mezclas de prueba, pero si reducen considerablemente el número de revisiones necesarias para obtener la mezcla definitiva.

Cuando una ceniza volante es usada para la fabricación del hormigón, se debe considerar una nueva relación agua-conglomerante¹ ($A/(C + P)$), es decir (Agua/(cemento + puzolana)). En lugar de la relación agua-cemento (A/C) usada en el método anterior. Existen dos procedimientos para la determinación de una ($A/(C + P)$) equivalente a una (A/C): a) El método de pesos equivalentes, b) el método de los volúmenes absolutos equivalentes. Explicaremos ambos métodos con un ejemplo:

Determinar la relación ($A/(C + P)$) equivalente a una relación $A/C = 0,60$; si la mezcla de hormigón tiene un % de cenizas volantes en peso del 20% y el peso específico de las cenizas es 2,40.

a) Método por peso equivalente¹:

$$\frac{A}{C + P} = \frac{A}{C} = 0,60: \text{ en este caso la relación es la misma directamente.}$$

(2 - 1)

y $F_w = \frac{P}{C + P} = 0,20$: porcentaje de puzolana en peso respecto al total del conglomerante, expresado como factor decimal.

Si se conociera el porcentaje de puzolana en volumen absoluto respecto al total del conglomerante F_v , para hallar F_w tendríamos:

(2 - 2)

$$F_w = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_e}{\rho_{ev}}\right)\left(\frac{1}{F_v} - 1\right)} \quad \text{donde } \rho_e, \rho_{ev}: \text{ pesos específicos del cemento y la ceniza volante respectivamente.}$$

b) Método por volumen absoluto equivalente¹:

$$\frac{A}{(C + P)} = \frac{A}{C} \times \frac{\rho_e}{\rho_e(1 - F_v) + \rho_{ev}(F_v)} \quad (2 - 3)$$

si no se conoce F_v , pero si F_w tenemos:

(2 - 4)

$$F_v = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_{ev}}{\rho_e}\right)\left(\frac{1}{F_w} - 1\right)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2,40}{3,15}\right)\left(\frac{1}{0,20} - 1\right)} = 0,247$$

La fórmula anterior fué obtenida en investigaciones Norteamericanas²⁷. En nuestro medio no se conocen relaciones de este tipo, por lo que en los cálculos usaremos las ecuaciones y resultados experimentales de U.S.A.

A pesar de que un alto porcentaje del cemento colombiano es marcado como portland tipo I, los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Colombia, para algunos cementos locales, nos hacen sospechar que realmente el cemento fabricado no es portland I, sino un portland adicionado. Una prueba rápida para afirmar esto es el ensayo de peso específico del cemento. Para un Portland I, el valor del peso específico es aproximadamente (3,15) (El cemento portland I japonés nos dió 3,17)*, mientras que los valores para algunos cementos locales es 3,05 (oscilando entre 3,00 y 3,10). Supongamos que el resultado de un ensayo con cemento local da un $\rho = 3,03$ calculemos el % de adiciones que lleva el cemento, si por ejemplo asumimos que son cenizas volantes cuya $\rho = 2,50$.

$$\% \text{ cenizas} + \% \text{ cemento} = 100 \quad (1)$$

$$(\% \text{ cenizas})(2,50) + (\% \text{ cemento})(3,15) = 3,03 \quad (2)$$

de (1) y (2) $\% \text{ cenizas} = 18,5\%$

$$\% \text{ cemento} = 81,5\%$$

* Realmente podemos tener diferencias en el Laboratorio debido a la falta de precisión en el pesaje!

$$\frac{A}{(C + P)} = \frac{3,15 \times 0,60}{3,15(1 - 0,247) + 2,40(0,247)} = 0,637 = 0,64$$

Además de lo anterior se debe tener en cuenta, desde el punto de vista de la resistencia del hormigón, que la relación $A/(C + P)$ no es equivalente a la relación A/C . Por ejemplo cuando una parte de cemento portland es sustituida por un material puzolánico las resistencias iniciales del hormigón serán más bajas que las de un hormigón donde no hay reemplazo del cemento por cenizas, pero después de algunas semanas la resistencia de un hormigón con cenizas aumenta y puede llegar a sobrepasar la resistencia del hormigón sin adiciones. (ver figura 19).

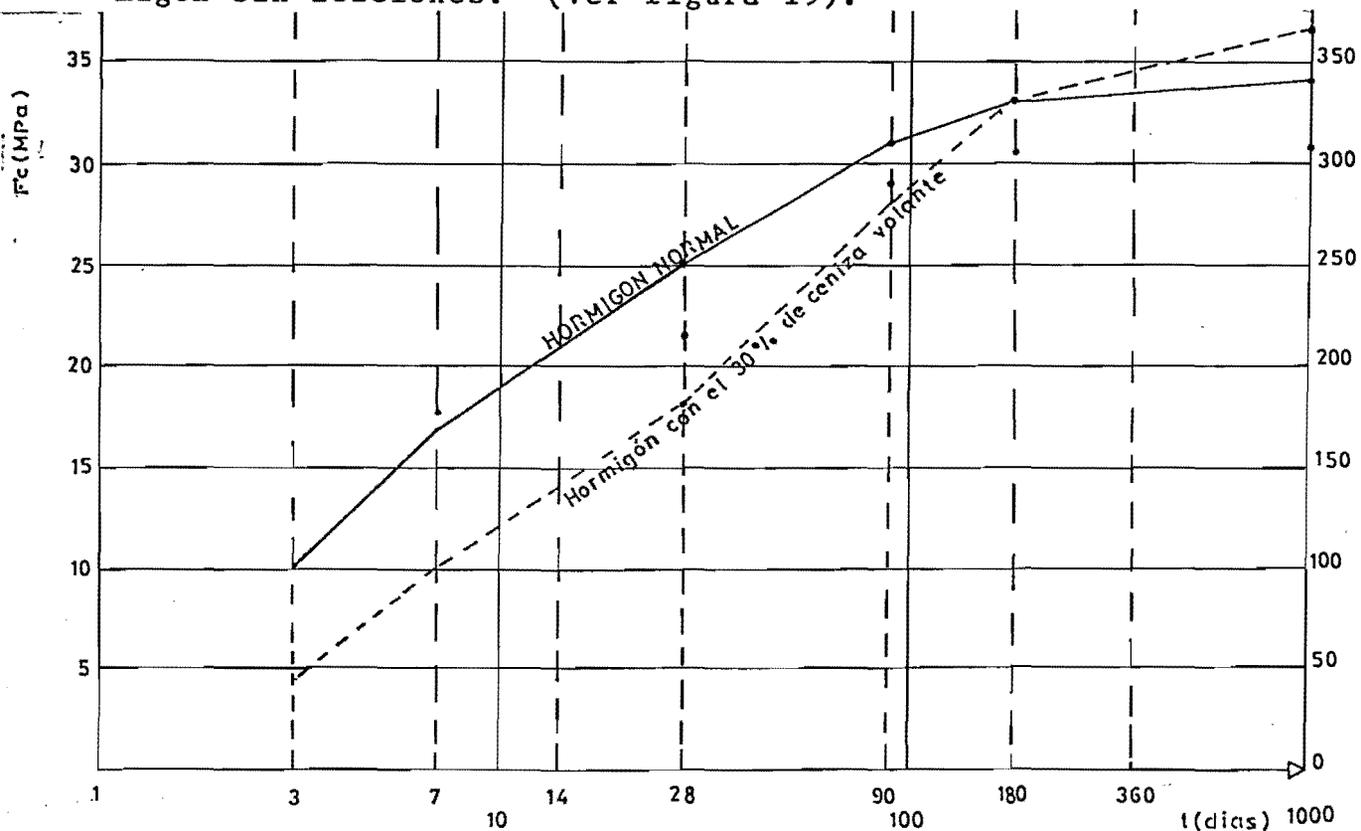


FIGURA 19. Comparación entre el desarrollo de resistencia de un hormigón normal y otro con cenizas²⁵.

La fórmula siguiente da los valores de $A/(C + P)$ equivalente, para una relación A/C , donde:

$$\frac{A}{(C + P)} = \frac{1}{(C/A) + 0,1846*0,001*F} \quad (2-5)$$

En donde;

A, C y P: Contenido en peso de agua, cemento y puzolana.

(C/A) : Relación cemento-agua, es decir el inverso de la relación (A/C) del hormigón sin adiciones.

$A/(C+P)$: Relación agua-cemento + puzolana, en peso, recomendada para la misma resistencia.

F : Contenido de cenizas del conglomerante (% en peso).

La gráfica de la ecuación sería:

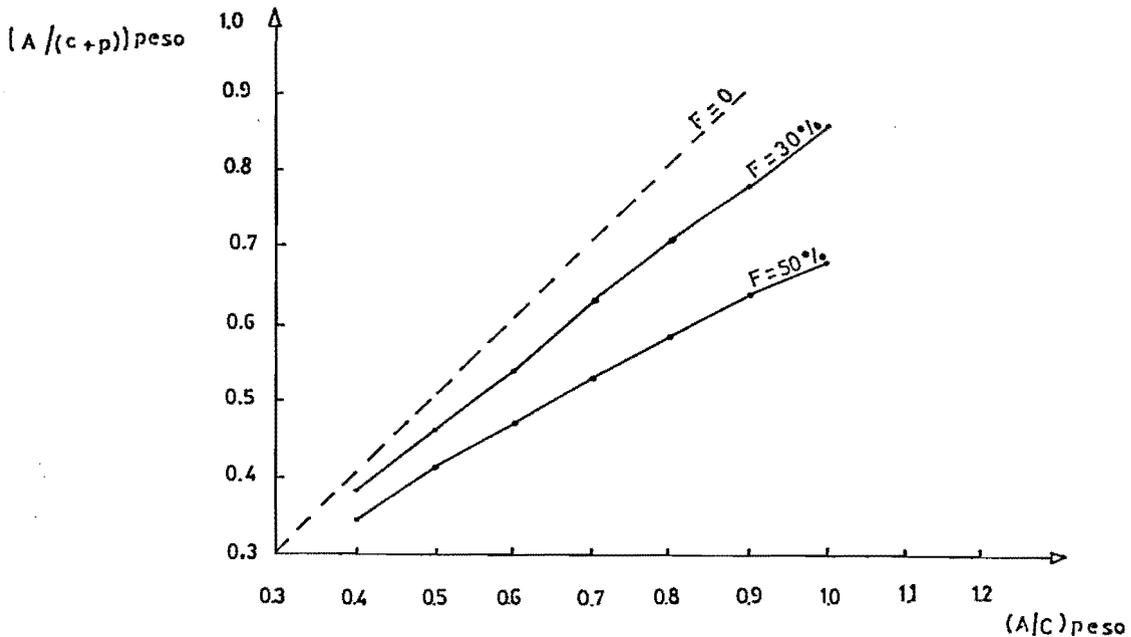


FIGURA 20. Gráfica de la ecuación 2-5

Este resultado se puede aceptar como válido ya que los cementos locales se están comportando efectivamente como un cemento adicionado, dando bajas resistencias las primeras semanas como se muestra en la figura 16 y 17 está por confirmar la resistencia a edades posteriores.

Una comparación importante entre los cementos colombianos y un cemento portland tipo I japonés con respecto a la resistencia es:

Promedio Cemento Colombiano			Cemento Japonés	
R_c	3 días	135 Kg/cm ²	197	Kg/cm ²
R_c	7 días	200 "	291	"
R_c	28 días	245 "	370	"

TABLA 14. Las especificaciones de cemento en algunas normas son^{2,8}:

Resistencia a la compresión del cemento A.S.T.M. C109
Icontec 220 (Kg/cm²)

Edad	Colombia		U. S. A. 1982		
	Portland I 1965	1982	Portland I	Portland IP	Portland P
3 días	≥ 65	≥ 80	≥ 124	≥ 124	-
7 "	≥ 130	≥ 150	≥ 193	≥ 193	≥ 103
28 "	≥ 210	≥ 240	≥ 280	≥ 241	≥ 207

2.3 Procedimiento para el diseño de mezclas de hormigón con cenizas volantes^{1,27}:

Ejemplo: se requiere un hormigón con cenizas volantes para la construcción de un muro de gravedad cuya resistencia a la compresión es de $f'c = 176 \text{ Kg/cm}^2$ y un $\sigma_n = 25 \text{ Kg/cm}^2$. Si se va a utilizar una ceniza cuyo costo es la mitad del cemento, hallar la cantidad de materiales por metro cúbico de hormigón y las proporciones en peso si los materiales a utilizar tienen las siguientes propiedades:

Ceniza	Cemento Portland I
Peso específico = 2,44	$G_c = 3,15$
Arena Aluvial	Grava Triturada
$d_{f\text{sss}} = 2,62$	$d_{g\text{sss}} = 2,72$
MF = 2,90	TM = 40mm(3/2")
$h_{af} = 1,5\%$	P.U.C. = 1,65g/cm ³
	$h_{ag} = 1\%$

2.3.1 Cálculo de la resistencia promedio de la mezcla $f'cr$.
De la figura 12 obtenemos un $f'cr = 210 \text{ Kg/cm}^2$.

2.3.2 Determinación del contenido de cenizas óptimo, F_{opt} ²⁶.

Se utiliza la siguiente expresión obtenida experimentalmente^{13,26}:

$$F_{opt} = 33,33 \left[\frac{K_c}{K_c - K_p} \right] - \sqrt{1111 \left(\frac{K_c}{K_c - K_p} \right)^2 - 0,5556 f'_{cr} - 902,8}$$

en donde:

F_{opt} : Porcentaje óptimo de cenizas en la mezcla para un costo mínimo (en peso)

K_c : Precio del cemento

K_p : Precio de las cenizas

f'_{cr} : Resistencia del hormigón requerida (Lbf/pulg²).

Ahora como $K_p = \frac{K_c}{2} \quad \therefore \quad \frac{K_c}{K_c - K_p} = 2$

$$F_{opt} = 33,33 * 2 - \sqrt{1111 * 2^2 - 0,5556 * 3000 - 902,8} \cong 23\%$$

El conglomerante estará compuesto de 77% de cemento portland I y 23% de cenizas volantes.

2.3.3 Cálculo de la relación A/(C + P):

Se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$f'_{cr} = 3250 \left[\frac{C + P}{A} - 0,5 \right] - 0,6 * F^2 \text{ (psi)}$$

o sea $\frac{A}{(C+P)} = \frac{3250}{f'_{cr} + 0,6 * F^2 + 1625} = \frac{3250}{3000 + 0,6 * 23^2 + 1625} = 0,66$

otra forma de calcular $\frac{A}{(C + P)}$ es :

$$\frac{A}{(C + P)} = \frac{1}{(C/A) + 0,1846 * 10^{-3} * F'}$$

En donde $\frac{C}{A}$ = es el inverso de la relación $\frac{A}{C}$ para un hormigón sin cenizas volantes.

Para un $f'_{cr} = 210 \text{ Kg/cm}^2$ el A.C.I. recomienda una $\frac{A}{C} = 0,68$ (figura 14), de donde $\frac{A}{C + P} = \frac{1}{(1/0,68) + 0,1846 * 10^{-3} * 23} = 0,64$. Valor aproximadamente igual al obtenido inicialmente (0,66). Para el diseño utilizaremos el primer valor (se puede utilizar cualquiera de los dos).

2.3.4 Determinación del contenido de agua y aire por metro cúbico de hormigón: A y a. La siguiente tabla, obtenida experimentalmente en U.S.A., se puede utilizar como una primera estimación del contenido de agua y aire en el hormigón:

TABLA 15. Contenido de agua y aire para hormigones con cenizas volantes²⁶.

Asentamiento (cm)	Contenido de agua en Kg por metro ³ de hormigón sin aire incluido para diferentes tamaños Agreg.		
	20 mm (3/4")	25 mm (1")	40 mm (1,5")
0 - 3	146 - 155*	137 - 147	131 - 136
3 - 5	163 - 173	158 - 165	152 - 155
5 - 10	179 - 188	173 - 179	169 - 170
10-15	190 - 200	181 - 188	175 - 179

% aire en el volumen total del hormigón

2,0

1,5

1,0

* Para agregado grueso redondeado se puede utilizar el primer valor del rango, para triturado el segundo valor.

En este ejemplo tenemos un asentamiento de 8 cm. y un tamaño máximo de 40 mm. (3/2") de agregado angular \therefore Agua = 170 Kgf por metro cúbico de hormigón, y el % aire = 1,0% del volumen total del hormigón.

2.3.5 Contenido de cemento y cenizas: C y P

$$\text{Tenemos } \frac{A}{C + P} = 0,66 \quad C + P = \frac{170}{0,66} \text{ Kg} \approx 257 \text{ Kg}$$

El peso de cenizas volantes: $P = 0,23 * 257 \text{ Kgf} = 59 \text{ Kgf}$

El peso de cemento Portland Tipo I: $C = 0,77 * 257 \text{ Kgf} = 198 \text{ Kgf}$

2.3.6 Contenido de agregado grueso: G

Utilizando la tabla 10 para un módulo de finura del agregado fino, MF = 2,90, y un tamaño máximo del agregado grueso, TM = 40 mm (1,5"), y una trabajabilidad normal, encontramos un volumen de agregado grueso seco y compactado con varilla de 0,71 m³ de hormigón.

Si el peso unitario seco y compactado con varilla del agregado grueso es de P.U.C. = 1650 Kgf/m³, el peso de grava por metro cúbico de hormigón será:

$$G = 0,71 \text{ m}^3 * 1650 \text{ Kgf/m}^3 = 1171,5 \text{ Kgf (seco)}$$

$$\text{y el } G_{\text{sss}} = 1171,5 \text{ Kgf} (1 + \% \text{abs} / 100) = 1171,5 \text{ Kgf} * 1,01 = 1183,2 \text{ Kgf (sss)}$$

2.3.7 Contenido de agregado fino: F

Por el método de los volúmenes absolutos tenemos:

Volumen absoluto de agua	=	170 Kg/m ³ /1000 Kg/m ³	=	0,170m ³
" " " cemento	=	198 Kg/m ³ /3150 Kg/m ³	=	0,063m ³
" " " cenizas	=	59 Kg/m ³ /2440	"	=0,024m ³
" " " grava	=	1183 Kg/m ³ /2720	"	=0,435m ³
" " " aire	=	0,01*(1)		<u>=0,010m³</u>

Volumen absoluto total sin el agregado fino = 0,702m³

Volumen absoluto de agregado fino = 1 - 0,702 = 0,298 m³

Peso de agreg. fino S.S.S. = $F_{SSS} = 0,298m^3 * 2620Kg/m^3 = 781Kg$

Peso del agreg. fino seco = $F_s = 781 Kg / 1.015 = 769 Kg$.

2.3.8 El peso de materiales por metro cúbico de hormigón es:

Agua	Cemento	Cenizas	Agreg. Fino	Agreg. Grueso
170 Kg	198 Kg	59 Kg	769 Kg	1171 Kg

y las proporciones en peso por unidad de cemento + cenizas es:

0,66 ; 1,0 : 2,99 : 4,56

2.3.9 Las correcciones y revisiones de las mezclas de prue-

ba siguen el mismo procedimiento empleado en el método anterior.

2.4 Resumen de las normas y especificaciones empleadas para la utilización de las cenizas en el hormigón².

La norma A.S.T.M. C-311.77² explica el muestreo y ensayos para el uso de las puzolanas naturales y cenizas volantes como adiciones, finamente divididas, en el hormigón de cemento portland. Define los siguientes ensayos:

Ensayos Químicos	Ensayos Físicos	Norma A.S.T.M.
Contenido de humedad	Finura con malla No.325	C340
Pérdida al fuego	Densidad	C188
Contenido de S_iO_2	Contracción por secado	C157
" " Al_2O_3 y Fe_2O_3	Sanidad	C151
" " MgO_2	Contenido de aire atrapado	C233
" " CaO	Indice de actividad puzolánica	C109
" " SO_3	Reactividad con álcalis	C441
" " Alcalis		

En la norma A.S.T.M. C618-80² se da las especificaciones para las cenizas volantes y puzolanas naturales usadas en la preparación del hormigón.

Para ello clasifica las puzolanas en los siguientes grupos:

- Clase N: Son todas las puzolanas naturales y las calcinadas
- " F: Son las cenizas volantes producidas por la combustión del carbón.
- " C: Son las F pero con propiedades cementantes por si solas.

Requisitos Químicos	Tipo de Puzolana		
	N	F	C
% mínimo ($S_iO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$)	70	70	50
% máximo SO_3	4	5	5
% máximo humedad	3	3	3
% máximo pérdida al fuego	10	12	6
% máximo álcalis (opcional)	1,5	1,5	1,5

Requisitos Físicos

- Finura (%máximo en malla No.325)	34	34	34
- Índice de actividad puzolánica, a 28 días. Mínimo % del control	75	75	75
% máximo de agua respecto al control	115	115	115
% máximo de expansión en autoclave	0,8	0,8	0,8
% máximo de variación del peso específico	5	5	5
% máximo de variación de la finura	5	5	5
% máximo de contracción por secado	0,03	0,03	0,03

PARTE DOS

METODOS:

Fuller-Thompson

Bolomey

Faury

INTRODUCCION

En la parte 1 se estudió el diseño de mezclas sin considerar prácticamente las granulometrías de los agregados en la dosificación del hormigón. Sin embargo los resultados dados por estos métodos dependen mucho de la calidad de los materiales utilizados. Por ejemplo los agregados finos y gruesos deben estar gradados como especifican las normas A.S.T.M. C-33 ó Icontec 174, libres de sustancias perjudiciales y de partículas alargadas y laminares. Como muchos agregados no cumplen estas especificaciones, el diseño de mezclas por los métodos de la parte 1 se convierte en un proceso iterativo largo, existiendo la posibilidad de no lograr resultados satisfactorios en resistencia, durabilidad, economía y trabajabilidad.

Los métodos analíticos se presentan como una solución parcial al problema de dosificación, ya que partiendo de unos agregados mal gradados, se puede conformar una granulometría conjunta del material que se ajuste aproximadamente a una curva típica tomada como referencia y obtenida experimentalmente de ensayos sobre trabajabilidad y peso unita-

rio máximo del hormigón. Entre estos métodos tenemos los siguientes:

1. Fuller Thompson
2. Weymouth
3. Bolomey
4. Faury
5. Joisel
6. Vallete
7. Dreux

Todos tienen una forma operacional muy similar y tienen la ventaja de poder combinar varios agregados para obtener así la granulometría más ajustada a la típica.



13. METODO FULLER-THOMPSON^{3,10,25}

En el año de 1907 Fuller y Thompson seleccionaron una curva granulométrica continua para la composición óptima de los agregados en el hormigón. La ecuación de la curva es de la forma $Y = 100(d/D)^m$, donde el valor de $m = 0,5$ y el significado de las otras variables es: $Y = \%$ en peso de agregados que pasan a través del Tamiz de abertura d ; D es el tamaño máximo del agregado.

Se recomienda utilizar este método cuando:

- La cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón es mayor de 300 Kgf.
- La estructura no está fuertemente armada
- El tamaño máximo del agregado es menor de 50 ± 20 mm ($2'' \pm 3/4''$).
- Los agregados son preferiblemente de forma redondeada

3.1 Procedimiento de diseño:

3.1.1 Selección de la consistencia del hormigón; se esco-

gerá, dependiendo del sistema que se utilizará en la compactación del hormigón en la obra, así:

TABLA 16. Selección de la consistencia del hormigón según la compactación.

Tipo Compactación	Consistencia	Utilización
Picado con barra	Blanda y fluída	Bombeo y hormigón fuertemente armado
Vibrocompactación	Seca	Prefabricados, estructuras masivas
Vibración normal	Plástica	Hormigón normal

En la tabla 17 se indican los asentamientos recomendados, medidos en el cono de Abrams y la fluidez en la mesa de flujo, para diferentes consistencias del hormigón.

TABLA 17. Asentamientos para diferentes consistencias del hormigón.

Consistencia	Asentamiento (cm)	Fluidez (%)
Seca	0 - 2	0 - 40
Plástica	2 - 5	40 - 70
Blanda	5 - 11	70 - 100
Fluida	11 - 20	100 - 130

3.1.2 Estimación del tamaño máximo del agregado: igual al método del A.C.I. pero el tamaño máximo se define en este método como la menor abertura de tamiz que retiene menos del 15% del peso total del agregado. (Ver método A.C.I. 211-1).

3.1.3 Determinación de la cantidad de agua de la mezcla: en la tabla 18 se indica la cantidad de agua por metro cúbico de hormigón cuando se emplean agregados de granulometría y propiedades físicas promedias y en mezclas con una relación A/C de 0,57, en peso y con un asentamiento de 76mm (3"). En la tabla 19 se dan las correcciones para modificar los valores dados en la tabla 18 si varían las condiciones supuestas.

TABLA 18. Cantidad de agua en Kgf por metro cúbico de hormigón.

Tamaño Máximo del Agregado mm (pulg)	Agua en Kgf para diferentes agregados	
	Agregado Redondeado	Agregado Triturado
	Kgf	Kgf
12,7 (1/2")	199	214
19,1 (3/4")	184	199
25,4 (1")	178	193
38,1 (3/2")	166	181
50,8 (2")	157	172
76,2 (3")	148	163
152,4 (6")	131	145

TABLA 19. Corrección de Tabla 18.

Cambio en las condiciones de la Tabla 16	Modificación en la cantidad de agua
Por cada 25mm de aumento o disminución en el asentamiento	± 3%*
Arenas trituradas	+ 6,8%
Hormigones poco trabajables	- 3,6%

* El signo + indica aumento y el - disminución, del contenido de agua en la mezcla.

3.1.4 Resistencia de diseño: Igual al método del A.C.I.
211,1.

3.1.5 Relación Agua-cemento: Igual al método A.C.I. 211,1

3.1.7 Determinación de los porcentajes de agregados en la mezcla: Como se dijo inicialmente la curva que este método toma como referencia para combinar granulométricamente los agregados es:

$$Y = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,5}$$

Variando D (tamaño máximo) y d (aberturas de las mallas) obtenemos las curvas de Fuller para diferentes agregados:

TABLA 20. Curvas de Fuller para diferentes tamaños máximos.

d mm (pulg)	Valores de Y para diferentes tamaños máximos (D)					
	12,5 (1/2")	20 (3/4")	25 (1")	40 (3/2")	50 (2")	63,5 (2 1/2")
63,5 (2 1/2")	-	-	-	-	-	100
50 (2")	-	-	-	-	100	89
40 (3/2")	-	-	-	100	86,6	77
25 (1")	-	-	100	81,6	70,7	63
20 (3/4")	-	100	86,5	71	61	55
12,5 (1/2")	100	81	70	57	50	44
9,5 (3/8")	87	71	61	50	43	39
4,8 (N° 4)	62	50	43	35	31	27
2,4 (N° 8)	44	35	31	25	22	19
1,2 (N° 16)	31	25	22	18	15	14
0,6 (N° 30)	22	18	15	12,5	11	9,7
0,3 (N° 50)	15	12,5	11	8,8	7,7	6,9
0,15 (N° 100)	11	8,8	7,7	6,2	5,4	4,8

El porcentaje en peso de agregado a mezclar se puede obtener por uno de los siguientes métodos:

- a. **Método por tanteos:** Este procedimiento es sencillo y rápido y con cierta práctica es posible lograr que la curva de composición se ajuste lo mejor posible a la de referencia. Una forma operacional de trabajar este método sería la siguiente: dibujamos la granulometría de los agregados a mezclar en una misma hoja de papel semilogarítmico en donde en el eje de las abscisas colocamos el tamaño del agregado (d) y en el eje de las ordenadas los porcentajes que pasan acumulados (Y).

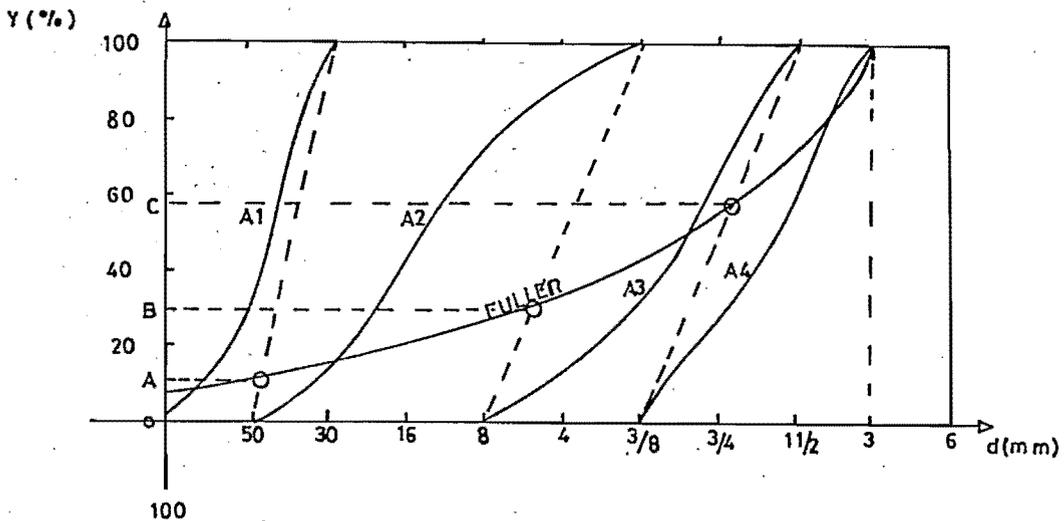


Figura 20 (Sin Escala)

Figura 21 Dosificación gráfica de agregados por Fuller

FIGURA 20.

Luego unimos con rectas los tamaños máximos y mínimos de agregados consecutivos. El punto donde estas rectas interceptan la curva de Fuller representa en el eje de las abscisas el % en volumen del agregado a combinar. Por ejemplo OA = % de agregado A1, AB = % agregado A2, BC = % de agregado A3 y 100 - = % de agregado A4. Con estos porcentajes se hará un primer tanteo de la mezcla y dibujando la combinación obtenida haremos los ajustes necesarios.

b. Método por los módulos de finura: este método es un procedimiento matemático, que basándose en el cálculo de los módulos de finura de los agregados, determina la mejor combinación de materiales a utilizar en el hormigón.

Consideremos n agregados (1, 2, 3, ..., n) y sean $MF_1, MF_2, MF_3, \dots, MF_n$ sus módulos de finura. Llamemos $MFF_2, MFF_3, MFF_4, \dots, MFF_n$ a los módulos de finura de las curvas de Fuller cuyos tamaños máximos coinciden con los de agregados 2, 3, 4, ..., n . Se desea determinar los porcentajes $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ que debemos emplear de cada agregado, para que la curva de composición se ajuste a la de referencia. Podemos plantear un sistema de n ecuaciones con n incógnitas que serán los t_i . El sistema es:

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \dots + t_n = 100$$

Como la curva de composición debe tener un módulo de finura similar al MFF_i de la curva de Fuller podemos plantear las siguientes ecuaciones:

$$MFF_n = \frac{MF_1xt_1+MF_2xt_2+MF_3xt_3+ \dots +MF_nxt_n}{t_1+t_2+t_3+ \dots +t_n}$$

$$MFF_{n-1} = \frac{MF_1xt_1+MF_2xt_2+ \dots +MF_{n-1}xt_{n-1}}{t_1+t_2+t_3+ \dots +t_{n-1}}$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$MFF_3 = \frac{MF_1xt_1+MF_2xt_2+MF_3xt_3}{t_1+t_2+t_3}$$

$$MFF_2 = \frac{MF_1xt_1+MF_2xt_2}{t_1+t_2}$$

La solución de este sistema de ecuaciones nos dará los $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ cuyos valores se pueden deducir fácilmente así:

Para dos agregados:

$$t_1+t_2 = 100 \quad \text{y} \quad MFF_2 = \frac{MF_1xt_1+MF_2xt_2}{t_1+t_2}$$

$$t_1 = 100 \frac{(MF_2 - MFF_2)}{(MF_2 - MF_1)} \quad \text{y} \quad t_2 = 100 - t_1$$

Para tres agregados:

$$t_1+t_2+t_3 = 100 \quad ; \quad t_1+t_2 = 100 \frac{(MF_3 - MFF_3)}{(MF_3 - MFF_2)}$$

$$t_1 = (t_1 + t_2) \frac{(MF_2 - MFF_2)}{(MF_2 - MF_1)} \quad \text{y} \quad t_3 = 100 - (t_1 + t_2)$$

y así continuamos sucesivamente para 4,5,6,...n agregados.

Para n agregados:

$$t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_{n-1} = 100 \frac{(MF_n - MFF_n)}{(MF_n - MFF_{n-1})}$$

$$t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_{n-2} = (t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_{n-1}) \frac{(MF_{n-1} - MFF_{n-1})}{(MF_{n-1} - MFF_{n-2})}$$

$$t_1 + t_2 = (t_1 + t_2 + t_3) \frac{(MF_3 - MFF_3)}{(MF_3 - MFF_2)}$$

$$t_1 = (t_1 + t_2) \frac{(MF_2 - MFF_2)}{(MF_2 - MF_1)}$$

$$t_2 = (t_1 + t_2) - t_1$$

$$t_3 = (t_1 + t_2 + t_3) - (t_1 + t_2)$$

$$t_{n-1} = (t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1}) - (t_1 + t_2 + \dots + t_{n-2})$$

$$t_n = 100 - (t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1})$$

3.1.8 Dosificación por metro cúbico: Una vez obtenidos los porcentajes de agregados que entran a formar parte de la mezcla, calculamos sus volúmenes absolutos para un metro cúbico

de hormigón. Para ello es necesario considerar que el volumen de la pasta (cemento + agua) es algo inferior que la suma de los volúmenes absolutos de cemento y agua; por lo que para obtener un metro cúbico de hormigón son necesarios 1025 dm³ de componentes. La cantidad de agua y cemento calculados inicialmente se restarán de 1025 dm³ y este será el volumen absoluto de agregados que habrá que repartir según los porcentajes $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$.

3.2 Ejemplo de diseño:

Se requiere una mezcla de hormigón de consistencia fluida para el vaciado de las losas de un edificio por bombeo, la resistencia a la compresión especificada en los planos y cálculos estructurales es de $f'c = 176 \text{ Kgf/cm}^2$ y la desviación típica de la firma constructora en la fabricación de este hormigón es de $\sigma_n = 25 \text{ Kgf/cm}^2$. Se van a utilizar los siguientes materiales:

Cemento Portland Tipo I	Arena		
	Fina	Gruesa	Cascajo
Peso específico=3,10	P.esp.apar.sat.= 2,50	2,55	2,60
P.U.suelto=1,12grf/ cm ³	% absorción = 1,50	1,45	1,20
	P.U.suelto(grf/ cm ³)= 1,54	1,60	1,67

Las granulometrías son:

TABLA 21.

Y: % que pasa acumulado, en peso

Malla	Arena Fina	Arena Gruesa	Cascajo
40 (3/2")	100	100	100
20 (3/4")	100	100	61
9,5 (3/8")	100	100	29
4,8 (N° 4)	100	100	0
2,4 (N° 8)	100	60	0
1,2 (N° 16)	100	30	0
0,6 (N° 30)	100	0	0
0,3 (N° 50)	60	0	0
0,15 (N°100)	20	0	0

3.2.1 Para una consistencia fluida escogamos un asentamiento, $S = 15$ cm.

3.2.2 El tamaño máximo del agregado total es 40mm (3/2").

3.2.3 La cantidad de agua para un $S = 7,5$ cm y un T.M. = 3/2" según tabla 18 es $A = 166$ Kgf pero para un $S = 15$ cm. según tabla 19 $A = 166 \times 1,09 = 180$ Kgf por metro cúbico de hormigón.

3.2.4 Para un $f'c = 176$ Kgf/cm² y una $\sigma_n = 25$ Kgf/cm², de la figura 12 obtenemos un $f'cr = 210$ Kgf/cm².

3.2.5 De la figura 13 para un $f'cr = 210$ Kgf/cm² obtene-

mos una $\frac{A}{C} = 0,60$ (curva U.N.).

3.2.6 El contenido de cemento por metro cúbico de hormi-
gón es = $C = \frac{180}{0,60} = 300$ Kgf.

3.2.7 Proporciones de los agregado: utilizando el método
de los módulos de finura:

Calculemos MFF_2 = módulo de finura de la curva de Fuller
para arena gruesa de tamaño máximo =
4,8 mm.

MFF_3 = módulo de finura de la curva de Fuller
para cascajo de tamaño máximo = 40 mm.

$$MFF_2 = \frac{(100-70,7)+(100-50)+(100-35)+(100-25)+(100-17,5)}{100} =$$

$$\frac{29,3 + 50 + 65 + 75 + 82,5}{100} = 3,02$$

$$MFF_3 = \left[(100-70,7)+(100-50)+(100-35)+(100-25)+(100-25) \right. \\ \left. +(100-17,5)+100-12,5)+(100-8,8)+(100-6,2) \right] / 100 = 5,75$$

Ahora los módulos de finura de los agregados a mezclar se-
rán:

$$MF_1 = \frac{40 + 80}{100} = 1,20 \text{ (Arena fina)}$$

$$MF_2 = \frac{40 + 70 + 100 + 100 + 100}{100} = 4,10 \text{ (Arena gruesa)}$$

$$MF_3 = \frac{39 + 71 + 100 + 100 + 100 + 100 + 100 + 100}{100} = 7,10 \text{ (Cascajo)}$$

Ahora aplicando las fórmulas obtenidas anteriormente; para tres agregados:

$$t_1 + t_2 = 100 \frac{(7,10 - 5,75)}{(7,10 - 3,02)} = 33,09\%$$

$$t_1 = 33,09 \frac{(4,10 - 3,02)}{(4,10 - 1,20)} = 12,32\%$$

$$t_2 = 20,77 \text{ y } t_3 = 100 - 33,09 = 66,91\%$$

Podemos trabajar con $t_1 = 12\%$, $t_2 = 21\%$ y $t_3 = 67\%$

Se puede llegar a este resultado procediendo por tanteos, como se explicó anteriormente. La granulometría resultante de mezclar con estas proporciones los agregados se puede calcular así:

Malla (mm)	Arena Fina (12%)	Arena Gruesa (21%)	Cascajo (67%)	Suma (%)	Fuller (%)
40	12	21	67	100	100
20	12	21	41	74	71
9,5	12	21	19	52	50
4,8	12	21	0	33	35
2,4	12	13	0	25	25
1,2	12	6	0	18	18
0,6	12	0	0	12	12,5
0,3	7,2	0	0	7,2	9
0,15	2,4	0	0	2,4	6

En el gráfico siguiente se puede visualizar la mezcla en una forma más clara.

3.2.8 Dosificación por metro cúbico:

$$\text{Volumen absoluto de cemento} = \frac{300 \text{ Kgf}}{3100 \text{ Kgf/m}^3} = 0,968 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen absoluto de agua} = \frac{180 \text{ Kgf}}{1000 \text{ Kgf/m}^3} = 0,1800 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen absoluto de agregados} =$$

$$1,025 \text{ m}^3 - 0,0968 \text{ m}^3 - 0,1800 \text{ m}^3 = 0,7482 \text{ m}^3$$

$$\text{Ahora: Volumen absoluto de arena fina} =$$

$$t_1 \times 0,7482 = 0,12 \times 0,7482 = 0,0898 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen absoluto de arena gruesa} =$$

$$t_2 \times 0,7482 = 0,21 \times 0,7482 = 0,1571 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen absoluto de cascajo} =$$

$$t_3 \times 0,7482 = 0,67 \times 0,7482 = 0,5013 \text{ m}^3$$

y los pesos se determinan así:

$$\text{Peso de arena fina sss} =$$

$$0,0898 \text{ m}^3 \times 2500 \text{ Kgf/m}^3 = 224,5 \text{ Kgf} = F_{1\text{sss}}$$

$$\text{Peso de arena gruesa sss} =$$

$$0,1571 \text{ m}^3 \times 2550 \text{ Kgf/m}^3 = 400,6 \text{ Kgf} = F_{2\text{sss}}$$

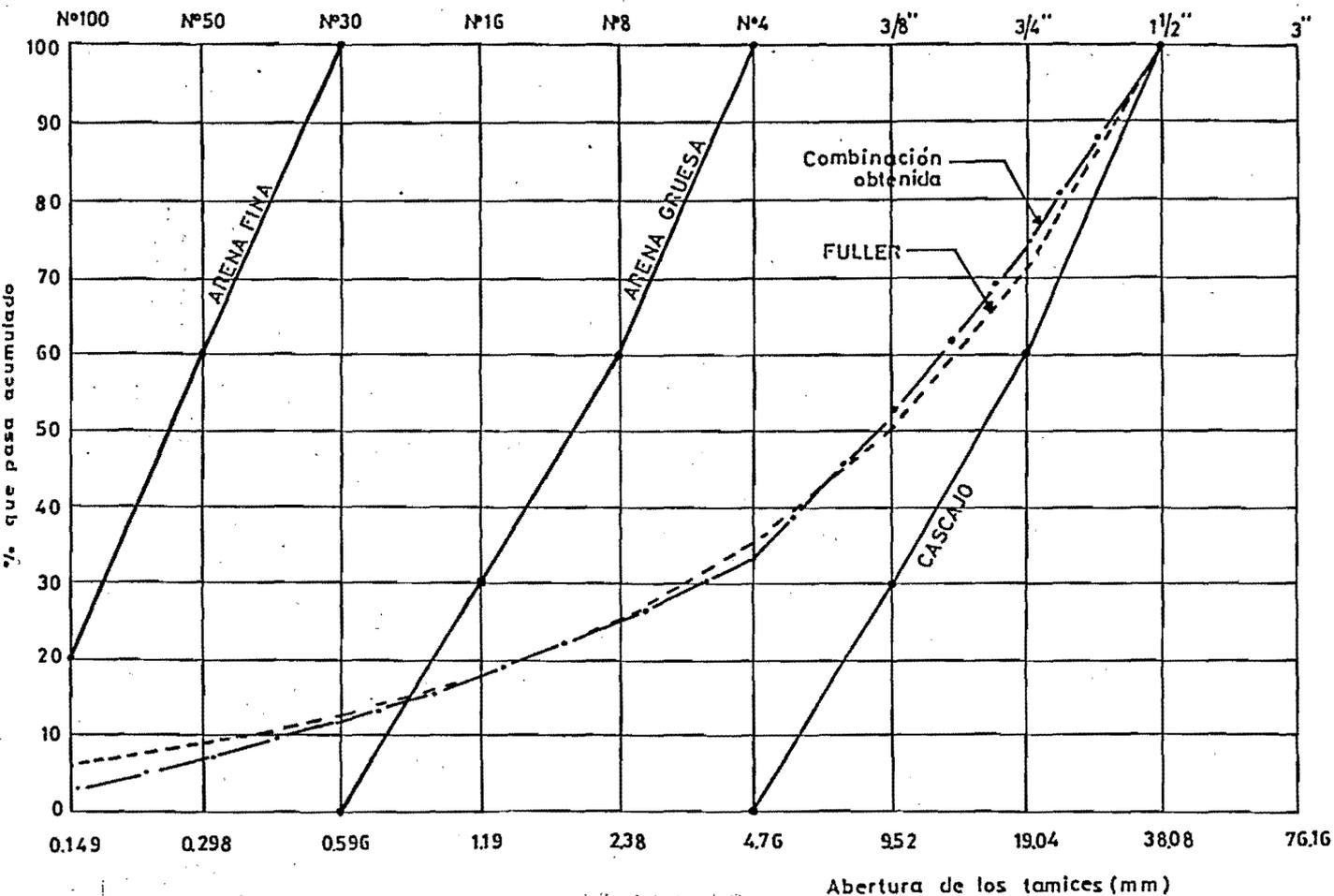


Figura 22 Grafica del ejemplo de Fuller.

Peso de cascajo sss = $0,5013 \text{ m}^3 \times 2600 \text{ Kg/m}^3 = 1303,4 \text{ Kg} = G_{\text{sss}}$

Los pesos secos serán $F_1 \text{ s} = 224,5 / 1,015 = 221,2 \text{ Kg}$

$F_2 \text{ s} = 400,6 / 1,0145 = 394,9 \text{ Kg}$

$G_s = 1303,4 / 1,012 = 1287,9 \text{ Kg}$

La mezcla inicial por peso y por metro cúbico de hormigón es:

Agua	Cemento	Arena Fina Seca	Arena Gruesa Seca	Cascajo Seco
180 Kgf	300 Kgf	221 Kgf	395 Kgf	1288 Kgf

Es decir:

0,60 : 1 : 0,74 : 1,32 : 4,29

3.2.9 Las correcciones por humedad, asentamiento y resistencia se harán en una forma similar al método del A.C.I. 211,1.

Nota: en algunos casos es necesario suministrar las proporciones del hormigón por volumen suelto, ya que no hay forma de pesar los materiales. En estos casos se puede proceder así:

$$\text{Volumen suelto cemento} = \frac{300 \text{ Kgf}}{1,120 \text{ Kgf/dm}^3} = 268 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volumen suelto de arena fina seca} = \frac{221 \text{ Kgf}}{1,540 \text{ Kgf/dm}^3} = 143,5 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volumen suelto de arena gruesa seca} = \frac{395 \text{ Kgf}}{1,600 \text{ Kgf/dm}^3} = 247 \text{ dm}^3$$

$$\text{Volumen suelto de cascajo seco} = \frac{1288 \text{ Kgf}}{1,670 \text{ Kgf/dm}^3} = 771 \text{ dm}^3$$

Los volúmenes sueltos de materiales son:

Agua	Cemento	Arena Fina	Arena Gruesa	Cascajo
180 dm ³	268 dm ³	143,5 dm ³	247 dm ³	771 dm ³

y tomando como unidad de volumen el cemento

0,67 ; 1 : 0,54 : 0,92 : 2,88

Se debe tener en cuenta que el agregado fino, principalmente, aumenta su volumen con la humedad, y el control de este fenómeno es difícil de manejar en las mezclas por volumen. Por ejemplo una arena con módulo de finura de 3,0 y una humedad total del 8% aumenta su volumen en un 30% del volumen inicial seco. Estas correcciones son esenciales para la obtención de un hormigón trabajable, resistente y durable.

4. METODO BOLOMEY 3,25,32

En el año 1925, Bolomey propuso una curva granulométrica continua de agregado más cemento, muy similar a la propuesta por Fuller - Thompson. La curva de Bolomey tiene su aplicación más importante en la dosificación de hormigones masivos (es decir para grandes macizos como en presas, muros de gravedad, vertederos, etc.).

4.1 Procedimiento de diseño: es muy similar al método estudiado en el capítulo III y en lo único que se diferencia es en la curva propuesta para combinar los agregados incluido el cemento.

4.1.1 Selección de la consistencia del hormigón: igual al método Fuller.

4.1.2 Escogencia del tamaño máximo del agregado: igual al método Fuller.

4.1.3 Determinación del contenido de agua; igual al método Fuller.

4.1.4 Cálculo de la resistencia de la mezcla: igual al método Fuller.

4.1.5 Relación agua-cemento: igual al método Fuller.

4.1.6 Contenido de cemento: igual al método de Fuller.

4.1.7 Proporciones de los agregados: la curva granulométrica que seleccionó Bolomey para combinar los agregados incluido el cemento es:

$$Y = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (4.1)$$

En donde Y: % que pasa acumulado por la malla de abertura d.

d: abertura de las mallas en mm. o pulg.

D: tamaño máximo del agregado total en mm. o pulg.

A: coeficiente que depende de la forma del agregado y la consistencia del hormigón, y se puede obtener de la tabla 22.

Para proporcionar los agregados se puede utilizar los siguientes métodos:

TABLA 22. Valores del coeficiente A de la ecuación de Bolomey.

Tipo Agregado	Consistencia	Asentamiento (cm)	A
Redondeado	Seca - Plástica	0 - 5	10
	Blanda	5 - 10	11
	Fluída	10 - 20	12
Triturado	Seca - Plástica	0 - 5	12
	Blanda	5 - 10	13
	Fluída	10 - 20	14

a. Por tanteo: se procede de la misma forma que el método por tanteos del capítulo III. Para un primer tanteo se escogen los % de material leídos en los ordenados de la curva granulométrica (Y) y que representan los puntos de corte de la línea que une los tamaños máximos y mínimos de dos agregados consecutivos y la curva de Bolomey así:

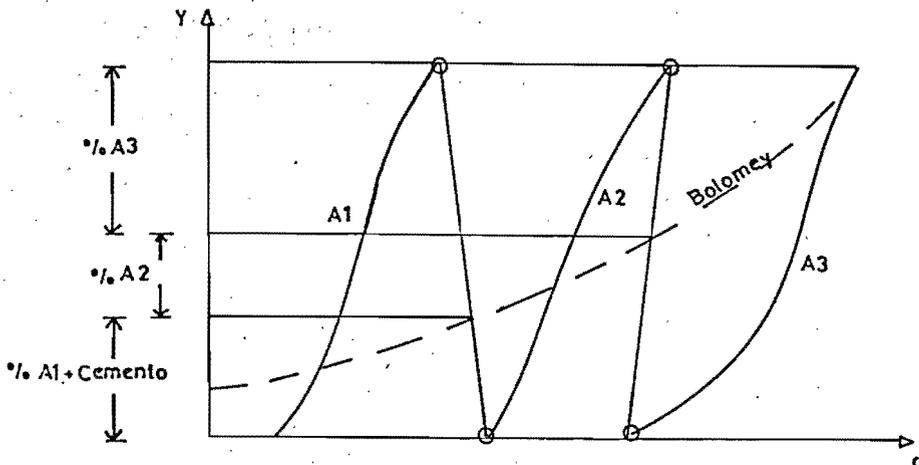


FIGURA 23. Sin escala

Dosificación gráfica de agregados por Bolomey

b. Por módulos de finura: consideremos $n + 1$ fracciones de agregado con módulos de finura $MF_0, MF_1, MF_2, MF_3, \dots, MF_n$ donde MF_0 es módulo de finura del cemento que se considera como un agregado más. Sean $MFB_1, MFB_2, MFB_3, \dots, MFB_n$ los módulos de finura de las curvas de Bolomey cuyos tamaños máximos son los de los agregados 1, 2, 3, ..., n. Se requiere determinar los porcentajes de cada uno de los agregados, $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ que debemos emplear, para que la curva de composición se ajuste aproximadamente a la de referencia.

Se puede plantear entonces un sistema de $n + 1$ ecuaciones con $n + 1$ incógnitas, que son los t_i .

$$\text{Tenemos: } t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n = 100$$

$$MFB_1 = \frac{t_0 MF_0 + t_1 MF_1}{t_0 + t_1}$$

$$MFB_2 = \frac{t_0 MF_0 + t_1 MF_1 + t_2 MF_2}{t_0 + t_1 + t_2}$$

$$MFB_3 = \frac{t_0 MF_0 + t_1 MF_1 + t_2 MF_2 + t_3 MF_3}{t_0 + t_1 + t_2 + t_3}$$

$$MFB_n = \frac{t_0 MF_0 + t_1 MF_1 + t_2 MF_2 + t_3 MF_3 + \dots + t_n MF_n}{t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}$$

Para resolver el sistema de ecuaciones debemos hacer las siguientes observaciones:

- La cantidad de cemento (t_0) en la mezcla se debe conocer
- El módulo de finura del cemento es $MF_0 = 0$
- Las curvas de referencia para obtener los MFB_i , no son las curvas de Bolomey, sino unas curvas modificadas obtenidas así: sea C_n la curva de Bolomey para el tamaño máximo total de los agregados. La curva C_{n-1} para el agregado siguiente de tamaño inmediatamente inferior (o sea el $n - 1$), será los 100/m de los ordenados, sobre los mismos tamices de la curva de referencia total desde el tamaño máximo del agregado $n - 1$, siendo m la ordenada de la curva C_n para el tamaño máximo del agregado $n - 1$. Se continúa así para los agregados $n - 2$, $n - 3$, etc.

El valor de t_0 está dado por:

$$t_0 = \frac{C/d_c}{1025 - A} \times 100 \quad 4.2$$

En donde: C = peso de cemento por metro cúbico de hormigón.

A = peso de agua por metro cúbico de hormigón

d_c = peso específico del cemento

t_0 = porcentaje de cemento en el total de agregados, en volumen absoluto

La Resolución del sistema de ecuaciones anterior para diferentes casos es:

- Para dos agregados:

$$t_1 = \frac{100(MF_2 - MFB_2) - t_0 MF_2}{MF_2 - MF_1} : \% \text{ agregado + fino}$$

4.3

$$t_2 = 100 - (t_0 + t_1) : \% \text{ agregado + grueso}$$

- Para tres agregados:

$$t_0 + t_1 + t_2 = 100 \frac{(MF_3 - MFB_3)}{(MF_3 - MFB_2)}$$

4.4

$$t_1 = \frac{(t_0 + t_1 + t_2)(MF_2 - MFB_2) - t_0 MF_2}{(MF_2 - MF_1)}$$

$$t_2 = (t_0 + t_1 + t_2) - (t_0 + t_1)$$

$$t_3 = 100 - (t_0 + t_1 + t_2)$$

- Para n agregados:

$$t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_{n-1} = 100 \frac{(MF_n - MFB_n)}{(MF_n - MFB_{n-1})}$$

$$t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_{n-2} = (t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1}) \frac{(MF_{n-1} - MFB_{n-1})}{(MF_{n-1} - MFB_{n-2})} \quad 4.5$$

$$\vdots$$

$$t_0 + t_1 + t_2 = (t_0 + t_1 + t_2 + t_3) \frac{(MF_3 - MFB_3)}{(MF_3 - MFB_2)}$$

Resolviendo para los t_i

$$t_1 = \frac{(t_0 + t_1 + t_2)(MF_2 - MFB_2) - t_0 MF_2}{(MF_2 - MF_1)}$$

$$t_2 = (t_0 + t_1 + t_2) - (t_0 + t_1)$$

$$t_3 = (t_0 + t_1 + t_2 + t_3) - (t_0 + t_1 + t_2)$$

⋮

4.6

$$t_{n-1} = (t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1}) - (t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_{n-2})$$

$$t_n = (t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n) - (t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_{n-1})$$

$t_3 =$

4.1.8 Dosificación por metro cúbico y proporciones iniciales: igual al método Fuller.

4.2 Ejemplo: dosificar una mezcla de hormigón para la construcción de un muro de contención tipo gravedad, la resistencia a la compresión del hormigón especificada en los planos estructurales es $f'c = 210 \text{ Kgf/cm}^2$ y se trabajará con una $\sigma_n = 34 \text{ Kgf/cm}^2$. Los agregados tienen las siguientes propiedades:

	Arena 1	Arena 2	Grava
Peso específico aparente saturado	2,50	2,55	2,60
% absorción	1,50	1,45	1,20
Peso Unitario suelto (grf/cm^3)	1,54	1,60	1,67

El cemento será portland tipo I cuyo peso específico es 3,05

% que pasa acumulado (Y)

Tamiz	Arena 1	Arena 2	Grava
3/2	100	100	100
3/4	100	100	61
3/8	100	100	29
N° 4	100	100	0
N° 8	100	60	0
N° 16	100	30	0
N° 30	100	0	0
N° 50	60	0	0
N°100	20	0	0

Procedimiento:

4.2.1 Se utilizará una consistencia fluida es decir un asentamiento de $S = 15$ cm.

4.2.2 El agregado disponible tiene un tamaño máximo de 3/2"

4.2.3 Utilizando las tablas ¹³ ~~16 y 17~~ del método Fuller hallamos el contenido de agua por metro cúbico de hormigón:

A = ~~180~~₁ Kgf.

4.2.4 Para un $f'c = 210$ Kgf/cm² y $\sigma_n = 34$ Kgf/cm² de la figura ~~12~~ obtenemos $f'cr = 255$ Kgf/cm².

¹³
cap 57

4.2.5 De la figura ~~13~~ para un $f'cr = 255$ Kgf/cm² (A/C) = 0,52

¹⁴
cap 60
146

4.2.6 El contenido de cemento será: $C = (180 \text{ Kg}) / (0,52) = 348 \text{ Kg}$

ahora $t_0 = \frac{348/3,05}{1025-181} \times 100 = 13,52\%$

4.2.7 Proporciones de los agregados

- Por el método de los módulos de finura:

La curva de referencia es: $Y = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$ en donde $A = 12$ según tabla 22. (agregados redondeados).
 $D = 1,5 \text{ pulg.}$

$$Y = 12 + 88 \sqrt{\frac{d}{1,5}} \text{ con } d \text{ en pulg.}$$

d	1,5"	3/4"	3/8"	3/16"	3/32"	3/64"	3/128"	3/256"	3/512"
Y	100	74,2	56	43,1	34	27,6	23	19,8	17,5

El módulo de finura de la curva de Bolomey para $D = 3/2$ es:

$$MFB_3 = \frac{(25,8+44+56,9+66+72,4+77+80,2+82,5)}{100} = 5,05$$

El módulo de finura de la curva de Bolomey modificada para $D = 3/16"$ (N° 4) que es el agregado inmediatamente inferior al anterior, se calcula así:

d	3/16	3/32"	3/64	3/128"	3/256"	3/512"
	$\frac{43,1 \times 100}{43,1}$	$\frac{34 \times 100}{43,1}$	$\frac{27,6 \times 100}{43,1}$	$\frac{23 \times 100}{43,1}$	$\frac{19,8 \times 100}{43,1}$	$\frac{17,5 \times 100}{43,1}$
Y	100	78,9	64	53,1	45,7	40,6

$$MFB_2 = \frac{21,1 + 36 + 46,9 + 54,3 + 59,4}{100} = 2,18$$

ahora:

$$\text{Módulo de finura de arena 1} = MF_1 = \frac{40 + 80}{100} = 1,20$$

Módulo de finura de arena 2 =

$$MF_2 = \frac{40 + 70 + 100 + 100 + 100}{100} = 4,10$$

Módulo de finura de la grava =

$$MF_3 = \frac{39 + 71 + 100 + 100 + 100 + 100 + 100 + 100}{100} = 7,10$$

Utilizando las ecuaciones para tres agregados

$$t_0 = 13,52\%$$

$$t_0 + t_1 + t_2 = 100 \frac{(7,1 - 5,05)}{(7,1 - 2,18)} = 41,7\%$$

$$t_1 = \frac{41,7(4,1 - 2,18) - 13,52 \times 4,1}{4,1 - 1,2} = 8,5\%$$

$$t_2 = 41,7 - (13,5 + 8,5) = 19,7\%$$

$$t_3 = 100 - 41,7 = 58,3\%$$

$$t_0 + t_1 + t_2 + t_3 = 13,5 + 8,5 + 19,7 + 58,3 = 100\%$$

Para los porcentajes obtenidos la curva es la siguiente:

% que pasa acumulado

Tamiz	Cemento (13,5%)	Arena 1 (8,5%)	Arena 2 (19,7%)	Grava (58,3%)	Suma
3/2	13,5	8,5	19,7	58,3	100
3/4	13,5	8,5	19,7	35,6	77,3
3/8	13,5	8,5	19,7	16,9	58,6
4	13,5	8,5	19,7	0	41,7
8	13,5	8,5	11,8	0	33,8
16	13,5	8,5	5,9	0	27,9
30	13,5	8,5	0	0	22,0
50	13,5	5,1	0	0	18,6
100	13,5	1,7	0	0	15,2

Tamiz	3/2	3/4	3/8	4	8	16	30	50	100
Curva Bolomey	100	74,7	56	43,1	34	27,6	23	19,8	17,5

La gráfica sería la siguiente:

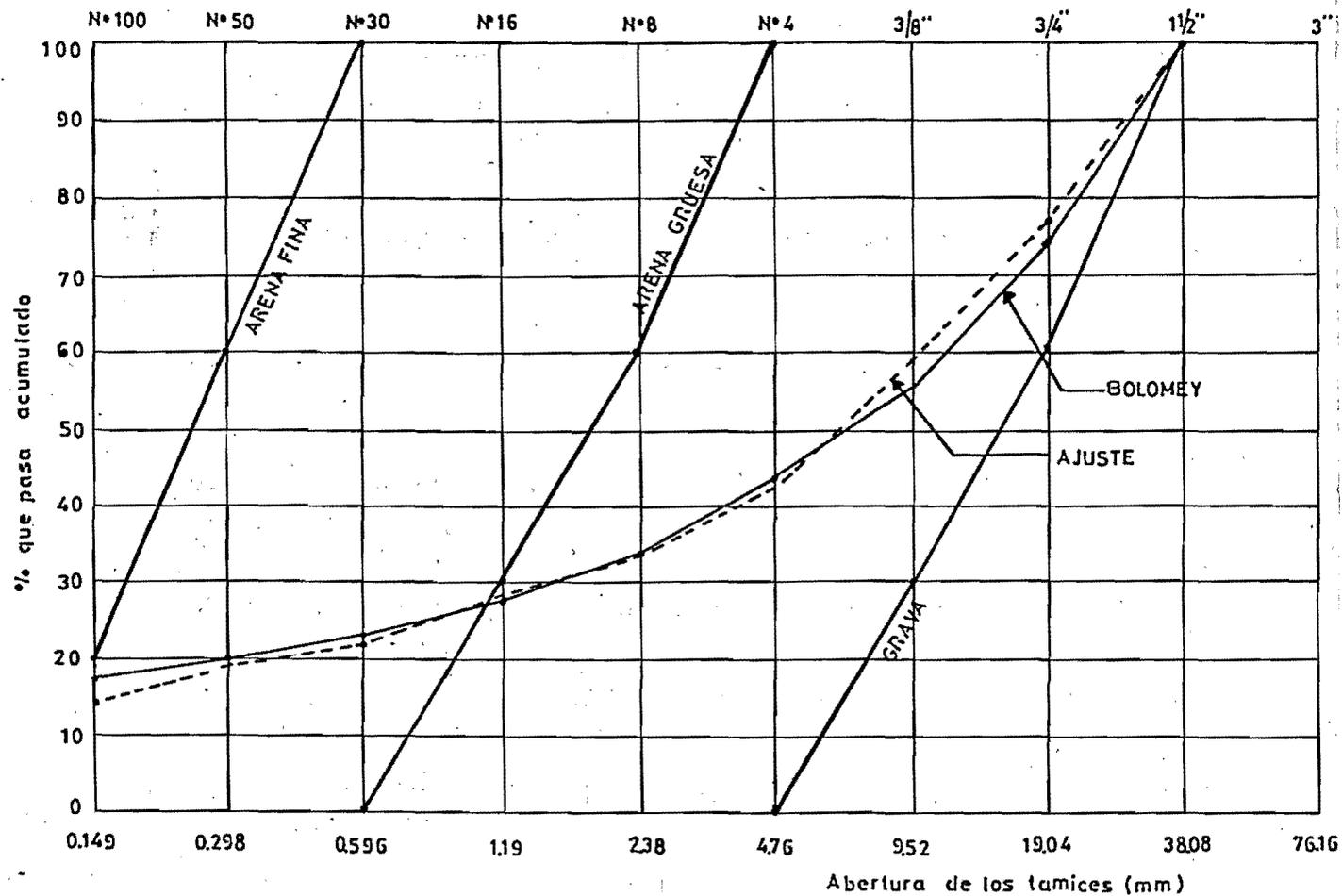


FIGURA 24.

Grafica del ejemplo de Bolomey

4.2.8 Proporciones iniciales del hormigón.

$$\text{Volumen absoluto de agregado + cemento} = 1025 \text{ dm}^3 - 180 \text{ dm}^3 = 845 \text{ dm}^3$$

$$\text{Peso de cemento} = 845 \times 13,5 \times 3,05/100 = 348 \text{ Kgf}$$

$$\text{Peso de arena 1} = 845 \times 8,5 \times 2,50/100 = 179 \text{ Kgf (S.S.S.)}$$

$$\text{Peso de arena 2} = 845 \times 19,7 \times 2,55/100 = 424 \text{ Kgf (S.S.S.)}$$

$$\text{Peso de grava} = 845 \times 58,3 \times 2,60/100 = 1281 \text{ Kgf (S.S.S.)}$$

Es decir:

Agua	Cemento	Arena 1	Arena 2	Grava
180 Kgf	348 Kgf	179 Kgf	424 Kgf	1281 Kgf

Las proporciones por unidad de cemento en peso serán:

0,52 : 1 : 0,51 : 1,22 : 3,68

y por volumen suelto:

0,58 ; 1 : 0,37 : 0,85 : 2,47

4.2.9 Las correcciones por humedad, asentamiento y resistencia, se harán en la misma forma que el método A.C.I.

5. METODO FAURY^{3,25,32}

5.1 Conceptos generales: fué propuesto en el año 1942, como consecuencia de un estudio general del hormigón realizado por Caquot. Faury propone una nueva ley granulométrica de tipo continuo que depende de la raíz quinta del tamaño del agregado ($\sqrt[5]{d}$). Su campo de aplicación más importante es en hormigones densamente armados y en estructuras prefabricadas.

La curva granulométrica ideal que conduce a la compacidad máxima del agregado (mínimo de huecos) es prácticamente un diagrama bilineal, distinguiéndose en el hormigón dos clases de agregados: los finos y medios cuyos tamaños son menores que la mitad del tamaño máximo de todos los agregados (menor que $D/2$), y los gruesos con tamaños mayores a $D/2$. La forma de la curva es la siguiente:

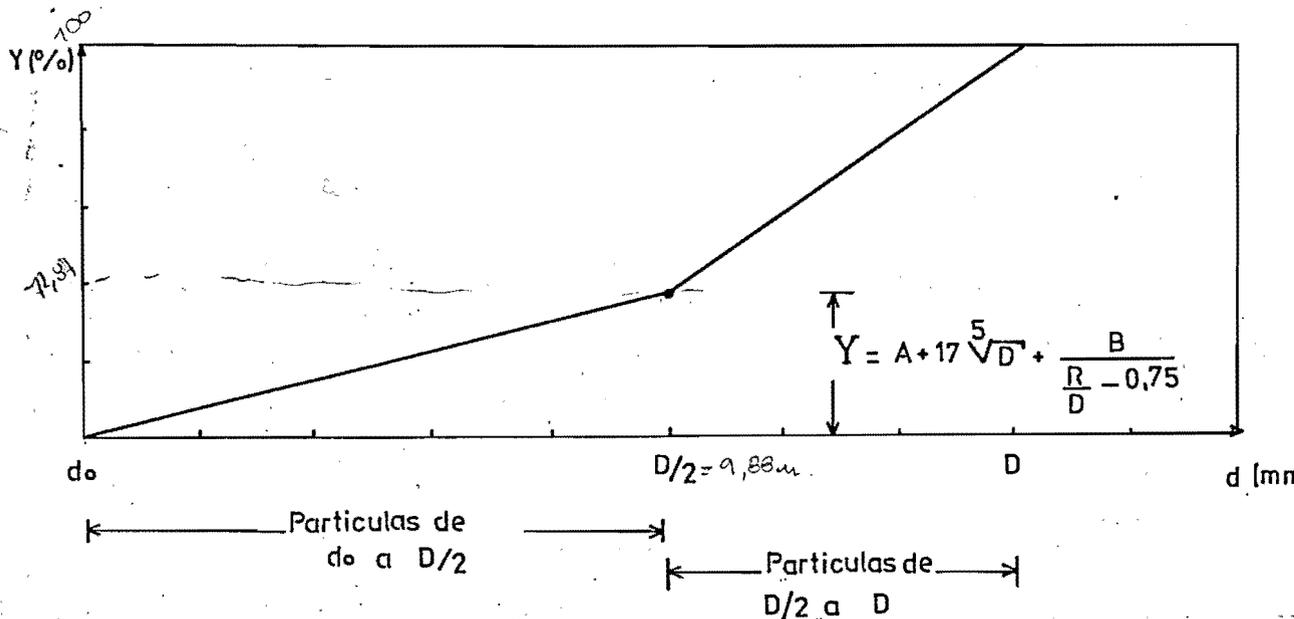


FIGURA 25.
Grafica de la ecuacion de Faury

En donde:

Y = % en volumen absoluto de agregados que pasan por las mallas de abertura d (incluyendo el cemento).

d = abertura de las mallas en mm. (Escala en proporción $\sqrt[5]{d}$)

d_0 = tamaño mínimo de los agregados. Se toma como 0.0065mm.

D = tamaño máximo de los agregados

A = coeficiente que depende de la forma de los agregados y la consistencia del hormigón.

R = Radio medio del encofrado en la zona más densamente ar-

mada (mm.)

Expliquemos más detalladamente la definición de algunas de estas variables.

Tamaño máximo del agregado: según Faury el tamaño máximo representa la menor abertura de tamiz por el cual pasa todo el agregado, se calcula así:

Sea d_1 : la abertura del primer tamiz de mayor a menor en donde se retiene agregado, y sea d_2 : el tamiz inmediatamente inferior

Como los tamices van en progresión geométrica de razón 2:

$$d_2 = \frac{d_1}{2}$$

Si D = tamaño máximo del agregado, mayor que d_1

x = peso de agregados retenidos en d_1

y = peso de agregados retenidos en d_2 y que pasan d_1 .

$$D = d_1 + (d_1 - d_2) \frac{x}{y} \quad (5.2)$$

Ejemplo: si la granulometría de un agregado es la siguiente, hallar D :

Tamiz	% Retenido acumulado		
3"	0	$d_1 = 1\frac{1}{2}"$	$x = 20\%$
1 1/2"	20	$d_2 = 3/4"$	$y = 70\%$
3/4"	70		
3/8"	90		
N° 4	100	$D = 1,5" + (1,5" - 0,75") \frac{20}{50} = 1,8"$	
		$D \approx 2" \approx 50 \text{ mm.}$	

Según la norma A.S.T.M. el $D = 2"$

Radio Medio del Encofrado: este se define como la relación del volumen del molde a su superficie. Pero el volumen que se considera no es el de todo el molde sino el de la zona más densamente armada. Por ejemplo consideremos la viga representada en la figura siguiente:

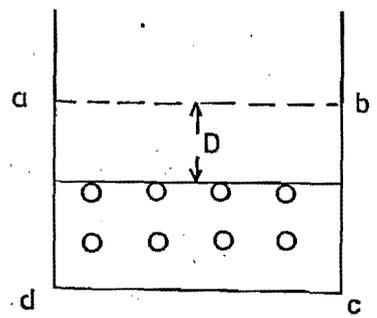


FIGURA 26.

Grafica para calcular el radio medio del encofrado "R"

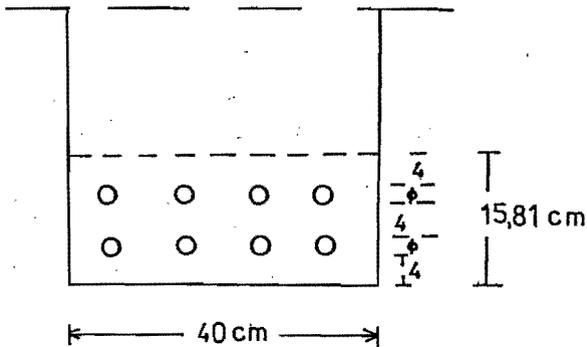
El volumen será el prisma limitado por un plano ab a una distancia D (Tamaño máximo del agregado) de las barras superiores del acero de refuerzo. Al volumen así considera-

do hay que restarle el volumen de las barras, con lo que se tendrá el volumen del molde V. La superficie del molde, en contacto con el hormigón es la suma de las caras bc, ed y da más la superficie de las barras.

El Radio medio del encofrado se calcula como:

$$R = \frac{V}{S} = \frac{(ab)(bc)(Largo) - V \text{ barras}}{(ad) + (dc) + (cb) + S \text{ barras}} \quad (5.3)$$

En el caso anterior por ejemplo si la viga es de $b = 40\text{cm}$. $h = 50\text{ cm.}$, con una luz de 5m. y las ocho barras son $\#6\phi = 1,905\text{ cm.}$ y el tamaño máximo del agregado es 4 cm.



$$A \text{ barras} = 8 \times 2,85 \text{ cm}^2 = 5,985 \text{ cm}^2$$

FIGURA 27. Ejemplo de calculo de "R"

Volumen molde = $(15,81)(40) - (2,85)(8) = 609,6 \text{ cm}^2$ por metro lineal
 Superficie del molde = $(15,81+40+15,81+8 \times 5.985) = 119,5 \text{ cm.}$

$$R = \frac{609,6}{119,5} = 51,01 \text{ mm.}$$

Conocido el radio medio del encofrado "R" y el tamaño máximo del agregado "D" se puede hallar la relación D/R conocida como el efecto pared. Por norma general Faury recomienda elegir gravas tales que $0,8 < D/R < 1,0$. Esto significa usar en el hormigón armado gravas de tamaño máximo entre 20 y 25 mm. (3/4" y 1").

Cuando el hormigón se coloca en estructuras masivas se puede asumir $D/R = 0$.

5.2 Procedimiento:

5.2.1 Determinamos el tamaño máximo del agregado

5.2.2 Calculamos el radio medio del encofrado R y revisamos el efecto pared.

5.2.2 Se calcula la ordenada Y de la curva de referencia en D/2 así: Ecuación (5.1).

$$Y = A + 15\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

En donde A y B se escogen de las siguientes tablas:

TABLA 23. Valores de B.

Compactación del hormigón	Valor de B
Vibración normal	1,5
Vibración potente	1,0

TABLA 24. Valores de A.

Condiciones en la colocación del hormigón en obra	Asentamiento (cm.)	Valores de A para varios Tipos de Agregados		
		Aluvial	Mixtos	Tritur.
Consistencia muy fluida, se colocará sin compactar.	> 15	≥ 32	≥ 34	≥ 38
Consistencia fluida, se colocará con baja compactac.	10 - 15	30 - 32	32 - 34	36 - 38
Consistencia blanda, compactación media	5 - 10	28 - 30	30 - 32	34 - 36
Consistencia seca, alta compactación	2 - 5	26 - 28	28 - 30	32 - 34
Consistencia muy seca, compactación potente	0,5 - 2	24 - 26	26 - 28	30 - 32
Consistencia de tierra húmeda, compactación muy potente	0	22 - 24	24 - 26	28 - 30
Compactación excepcionalmente potente	-	≤ 22	≤ 24	≤ 28

5.2.4 Determinación del Volumen de huecos: V_H

Se ha demostrado experimentalmente que el volumen de huecos, V_H , en el hormigón depende, de la consistencia de la mezcla, de la naturaleza de los agregados, de la potencia de compactación y del tamaño máximo del agregado. Se puede calcular el V_H en una masa indefinida como:

$$V_H = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} \quad (5.4)$$

y en un molde teniendo en cuenta el efecto pared:

$$V_H = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75} \quad (5.5)$$

En donde:

D = Tamaño máximo del agregado en mm.

K = Coeficiente que depende de la consistencia del hormigón, de la potencia de compactación, y de la naturaleza de los agregados.

K' = Coeficiente que depende de la potencia de compactación y es igual a 0,003 para compactación normal y vale 0,002 para alta compactación.

TABLA 25. Valores de K.

Condiciones en la colocación del hormigón en obra	Valores de K para diferentes Agregados*		
	Redondeados	Mixtos	Triturados
Consistencia muy fluida Sin compactación	$\geq 0,370$	$\geq 0,405$	$\geq 0,450$
Consistencia blanda Compactación Media	0,350-0,370	0,375-0,405	0,430-0,460
Consistencia seca alta compactación	0,330-0,350	0,355-0,385	0,400-0,430
Consistencia de tierra húmeda, compactación muy potente	0,250-0,330	0,330-0,350	0,350-0,370
Consistencia extra-seca compactación excepcionalmente potente	$\leq 0,250$	$\leq 0,330$	$\leq 0,350$

* Para agregados de forma y granulometría aceptable se recomienda usar el valor mínimo del rango.

5.2.5 Cálculo del contenido de agua:

Multiplicando el volumen de huecos por 1000 tendremos el peso de agua por metro cúbico de hormigón. Si el hormigón es con aire incluido al volumen de huecos se le restará el volumen de aire para obtener la cantidad de agua A.

$$\text{Peso de agua} = A = 1000 \times (V_H - V_a) \quad (5.6)$$

Si el volumen de aire, V_a , es cero $A = 1000 \times V_H$ (5.7)

5.2.6 Resistencia de diseño de la mezcla: f'_{cr} igual al método A.C.I.

5.2.7 Relación A/C en peso: igual al método A.C.I.

5.2.8 Cantidad de cemento: como ya se conoce el agua y la relación A/C $\Rightarrow C = A/(A/C)$. Para conocer el % en volumen absoluto de cemento con respecto al volumen absoluto de los sólidos en el hormigón, utilizaremos la siguiente expresión:

$$c = \frac{C}{\rho_c} \times \frac{1}{1 - V_H} \quad (5.8)$$

En donde:

c = % en volumen absoluto de cemento respecto al volumen total de materiales sólidos en el hormigón.

C = Peso de cemento por metro cúbico de hormigón.

ρ_c = Peso específico del cemento

V_H = Volumen de huecos

5.2.9 Proporciones de los agregados: se pueden calcular por uno de los siguientes métodos:

- **Por tanteos:** requiere un poco de práctica y experiencia en el manejo del método, pero una vez se solucione este problema, resulta bastante cómodo y rápido obtener la mezcla que mejor se adapte a la curva de referencia. Una regla práctica sería comenzar un primer tanteo con igual porcentaje de agregados y luego se irá ajustando la mezcla para que se adapte mejor a la curva de referencia.
- **Gráficamente:** es un procedimiento útil y preciso que basándose en las curvas granulométricas de los agregados, y aplicando ciertas reglas prácticas permiten obtener los porcentajes de cada uno de los agregados a mezclar. Las proporciones de cada agregado se obtienen levantando verticales en las zonas de frontera de agregados consecutivos, y en los puntos donde estas verticales corten a la curva de referencia se lee en el eje de las ordena-

das los porcentajes de cada material. Veamos: (Figura 28.).

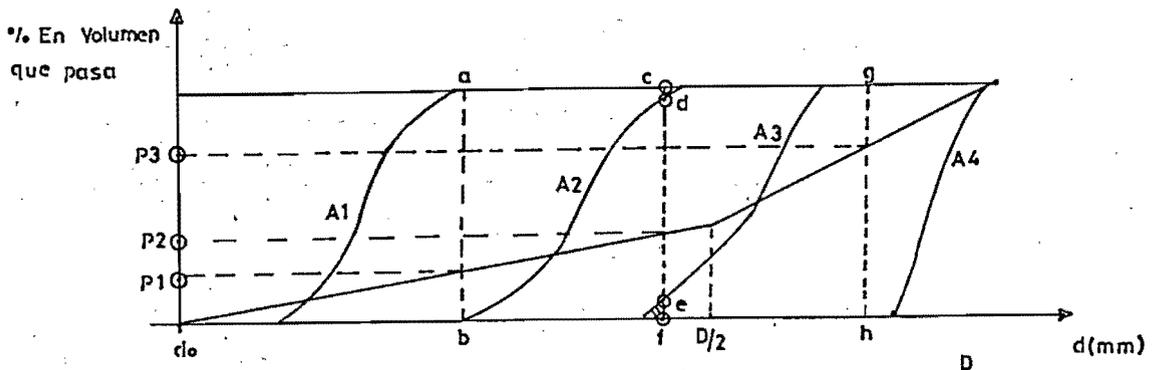


FIGURA 28.

Dosificación grafica de agregados por Faury

En caso de los agregados A1 y A2 no hay duda de la dimensión frontera de ambos; trazamos la vertical ab y leemos en el eje de las ordenadas un porcentaje P_1 .

Para los agregados A2 y A3 que se traslapan, la dimensión frontera es aquella donde cd es igual a ef. Trazando la línea ef leemos un porcentaje P_2 , finalmente para los agregados A3 y A4 la dimensión frontera puede considerarse como la abertura de tamiz correspondiente a la media de

las abcisas extremas de la frontera de los agregados, trazando la línea gh leemos % P_3 .

En resumen los porcentajes de cada uno de los agregados serían: $(P_1 - c)$ de A1, $(P_2 - P_1 - c)$ de A2, $(P_3 - P_2 - P_1 - c)$ de A3 y $(100 - P_3 - P_2 - P_1 - c)$ de A4.

- **Por índices ponderables:** este es un procedimiento matemático, cuya forma operacional es muy similar al método de los módulos de finura visto anteriormente.

Por definición el índice ponderal de una mezcla de agregados es igual a la suma de los productos obtenidos multiplicando la proporción en volumen absoluto de cada tamaño por el índice ponderal correspondiente. Para cada tamaño de agregados existe un índice ponderal como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 26. Valores de I_p . para agregados

Tamaño de Partículas (mm)	Indice Ponderal (I_p)
Lodos y cemento < 0,1	1,000
Arena fina 0,1 - 0,4	0,790
Arena media 0,4 - 1,6	0,695
Arena gruesa 1,6 - 6,3	0,390
Grava fina 6,3 - 12,5	0,240
Grava media 12,5 - 25,0	0,160
Grava gruesa 25,0 - 50,0	0,100
Piedras 50,0 - 100,0	0,040

En muchos casos tenemos agregados cuyos límites de tamaño no están en la tabla anterior, por lo que se puede utilizar la siguiente figura³².

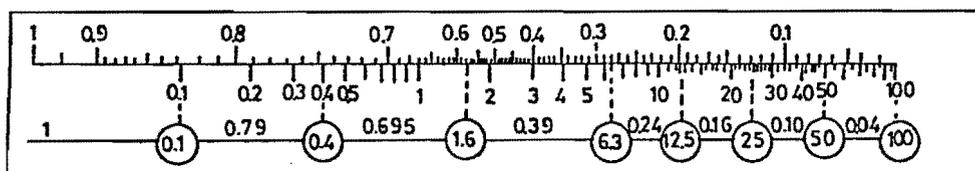


FIGURA 29. Valores I_p ³²

En donde la escala inferior representa los tamaños en mm. de las partículas de agregado y la superior los valores de los índices ponderables. Para conocer el I_p de un agregado, bastará con determinar el punto medio en la escala inferior de los tamaños extremos del agregado; por ejemplo el índice ponderal de un agregado de 10 mm. a 20 mm. (que no está en la tabla) es 0,185.

Veamos como se opera en un caso práctico. Supongamos que tenemos dos arenas, una fina y otra gruesa para fabricar un hormigón. Hallemos las proporciones de cada agregado.

Por el método de los índices ponderables, sean:

a_1 : proporción de arena fina

a_2 : proporción de arena gruesa

g : proporción de grava

e : proporción de cemento, dato conocido

$$a_1 + a_2 + g + c = 1 \quad (1)$$

Las otras relaciones se determinarán utilizando las dos condiciones siguientes:

a. Los pesos de las partículas menores de 1,6 mm. son las mismas para el hormigón a fabricar y para el hormigón de referencia.

b. El hormigón a fabricar y el hormigón de referencia tienen el mismo peso, o sea el mismo índice ponderal.

Sean f_1 , F_1 y M_1 las proporciones de lodo, arena fina y arena media respectivamente contenidas en el agregado 1;

y f_2 , F_2 y M_2 las proporciones de lodo, arena fina y arena media respectivamente contenidas en el agregado 2.

La proporción de granos menores de 0,1 mm. será: $f_1 a_1 + F_2 a_2 + c$

La proporción de granos entre 0,1 mm. y 0,4 mm. es: $F_1 a_1 + F_2 a_2$

La proporción de granos entre 0,4 mm. y 1,6 mm. es: $M_1 a_1 + M_2 a_2$

Por lo tanto el índice ponderal de las partículas menores que 1,6 mm. será:

$$(f_1 a_1 + f_2 a_2 + c) \times 1,0 + (F_1 a_1 + F_2 a_2) \times 0,790 + (M_1 a_1 + M_2 a_2) \times 0,695:$$

Reagrupando

$$c + a_1 (f_1 + 0,79 F_1 + 0,695 M_1) + a_2 (f_2 + 0,79 F_2 + 0,695 M_2) \quad (2)$$

hemos dicho en a. que esto tiene que ser igual al índice ponderal de las partículas menores de 1,6 mm. en el hormigón de referencia. Para determinar el Ip de las partículas menores de 1,6 mm. en el hormigón de referencia se puede proceder utilizando la siguiente figura:

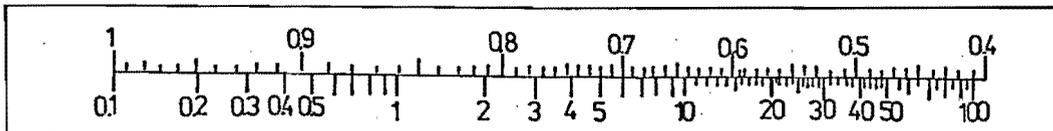


FIGURA 30. I_o para el hormigón de referencia³²

El tamaño máximo del conjunto de partículas se busca en la escala inferior y en la superior se lee directamente el índice ponderal del conjunto (I_o). Ahora sobre la curva de referencia se lee el valor de la ordenada para un tamaño de 1,6 mm. (x); el índice ponderal buscado será:

$$I_p = \frac{x}{100} \times \frac{I_o}{1,6} \quad (3)$$

Igualando las ecuaciones (2) y (3) hallamos la segunda ecuación.

Finalmente la tercera ecuación se obtiene calculando el I_p de cada agregado y el índice del conjunto será:

$$I_{p_c} = c \times 1 + a_1 I_{pa_1} + a_2 I_{pa_2} + g I_{pg} = I_{pr} \quad (4)$$

I_{p_c} = índice ponderal del conjunto

I_{pr} = índice ponderal del hormigón de referencia

Este índice será igual al del hormigón de referencia. Este está compuesto de partículas entre 0 y $D/2$ en proporción $Y/100$ y de partículas ($D/2 - D$) en proporción $(1 - Y/100)$.

Para las partículas de (0 - $D/2$) el I_p se lee de la figura 30 y el ($D/2 - D$) en fig. 29. Igualando estos índices y

resolviendo el sistema hallamos a_1 , a_2 y g .

5.2.10 Proporciones del hormigón: conocidos los % en volumen absoluto de los materiales que componen el hormigón, hallaremos los pesos de cada uno multiplicando el % por $1000(1 - V_H)$ x peso específico aparente saturado.

5.2.11 Correcciones por humedad, asentamiento y resistencia: igual al método A.C.I.

5.3 Ejemplo: dosificar una mezcla de hormigón para la construcción de vigas y columnas de un edificio. La resistencia especificada es $f'c = 210 \text{ Kgf/cm}^2$ y se trabajará con una $\sigma_n = 34 \text{ Kgf/cm}^2$, los materiales a utilizar tienen las siguientes características:

Malla (mm)	% que pasa acumulado	
	Arena Redondeada	Grava Tritura
25	100	100
12,5	100	44
6,3	90	7
1,6	70	0
0,4	30	0
0,1	2	0
Peso específico aparente satur.	2,62	2,58
% absorción	0,50	0,30
Peso unitario suelto	1,50 grf/cm ³	1,35 grf/cm ³

La sección más densamente armada es:

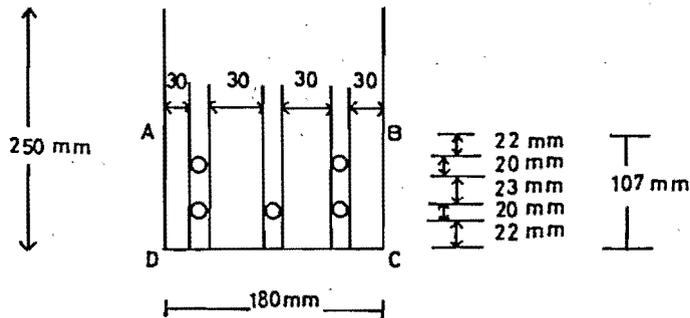


FIGURA 31.

Sección más densamente armada en el ejemplo

Procedimiento:

5.3.2 Radio medio del encofrado: $R = \frac{V}{S}$

$$V = (180 \times 107) - 5(\pi \times 20^2)/4 = 17690 \text{ mm}^3/\text{mm}.$$

$$S = 2 \times 107 + 180 + 5(2 \times \pi \times 10) = 708 \text{ mm}^2/\text{mm}.$$

$$\text{Por lo tanto: } R = \frac{17690 \text{ mm}^3}{708 \text{ mm}^2} = 24,98 \text{ mm} \approx 25 \text{ mm}.$$

ahora $\frac{D}{R} = \frac{22}{25} = 0,88$ es decir el D escogido para esta estructura cumple satisfactoriamente el efecto pared.

5.3.3 Cálculo de la ordenada de la curva de referencia:

Ecuación (5.1)

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Usaremos los siguientes valores de A y B. A = 31 B = 1,5, para un hormigón de consistencia blanda (asentamiento entre 5 y 10 cm.), compactación media, y agregados mixtos (arena redondeada, grava triturada).

$$Y = 31 + 17\sqrt[5]{22} + \frac{1,5}{\frac{25}{22} - 0,75} = 66,43\%$$

Es decir la ordenada de la curva de referencia en $D/2 = 11$ mm. es $Y = 66,43\%$.

5.3.4 Determinación del volumen de huecos, $V_H = \frac{K}{\sqrt[5]{D}} + \frac{K'}{\frac{R}{D} - 0,75}$

En donde K y K' tienen los siguientes valores:

K = 0,375 - 0,405 para consistencia blanda compactación media y agregados mixtos.

K' = 0,003 para compactación media (normal).

Se usará un K = 0,390 ; $V_H = \frac{0,390}{\sqrt[5]{22}} + \frac{0,003}{\frac{25}{22} - 0,75} = 0,218$

5.3.5 Contenido de agua; A: para hormigón sin aire inclui-

do $A = V_H \times 1000 = 218 \text{ Kgf}$

5.3.6 Resistencia de la mezcla de hormigón $f'_{cr} = ?$ Si $f'c = 210 \text{ Kgf/cm}^2$ y $\sigma = 34 \text{ Kgf/cm}^2$ de figura 12 $f'_{cr} = 255 \text{ Kgf/cm}^2$.

5.3.7 Relación agua-cemento: si $f'_{cr} = 255 \text{ kgf/cm}^2$ de fig. 13 $A/C = 0,52$; no hay problemas de durabilidad.

5.3.8 Contenido de cemento; $C = A/(A/C) = 218 \text{ Kgf}/0,52 = 419 \text{ Kgf}$

ahora el porcentaje de cemento en volumen absoluto será:

$$c = \frac{419}{3150} \times \frac{1}{1-0,218} = 0,17$$

5.3.9 Proporciones de los agregados:

a. Por tanteos: la cantidad de agregados es $100 - 17 = 83\%$

Un primer tanteo sería:

$$\text{Arena} = \frac{83}{2} = 41,5\% \quad \text{Grava} = \frac{83}{2} = 41,5\%$$

Se obtendrá la siguiente mezcla. (ver gráfica)

Tamiz (mm.)	% que pasa acumulado			Suma
	Cemento	Arena	Grava	
25	17	41,5	41,5	100
12,5	17	41,5	18,3	76,8
6,3	17	37,3	2,9	57,2
1,6	17	29,0	0,0	46,0
0,4	17	12,4	0,0	29,4
0,1	17	0,8	0,0	17,8

- Metodo gráfico: levantando una vertical por la frontera de los dos agregados, línea ab, obtenemos el punto c donde esta corta la curva de referencia de Faury, el punto c en el eje de las ordenadas representa el valor $d=58\%$.

Por lo tanto:

Porcentaje de partículas menores a $D/2(11 \text{ mm.}) = 58\%$

y % de partículas mayores a $D/2 = 42\%$

% cemento = 17% %arena = 41% % grava = 42%

La mezcla obtenida será:

Tamiz (mm.)	% que pasa acumulado			Suma
	Cemento	Arena	Grava	
25	17	41	42	100
12,5	17	41	18,5	76,5
6,3	17	36,9	2,9	56,8
1,6	17	28,7	0,0	45,7
0,4	17	12,3	0,0	29,3
0,1	17	0,8	0,0	17,8

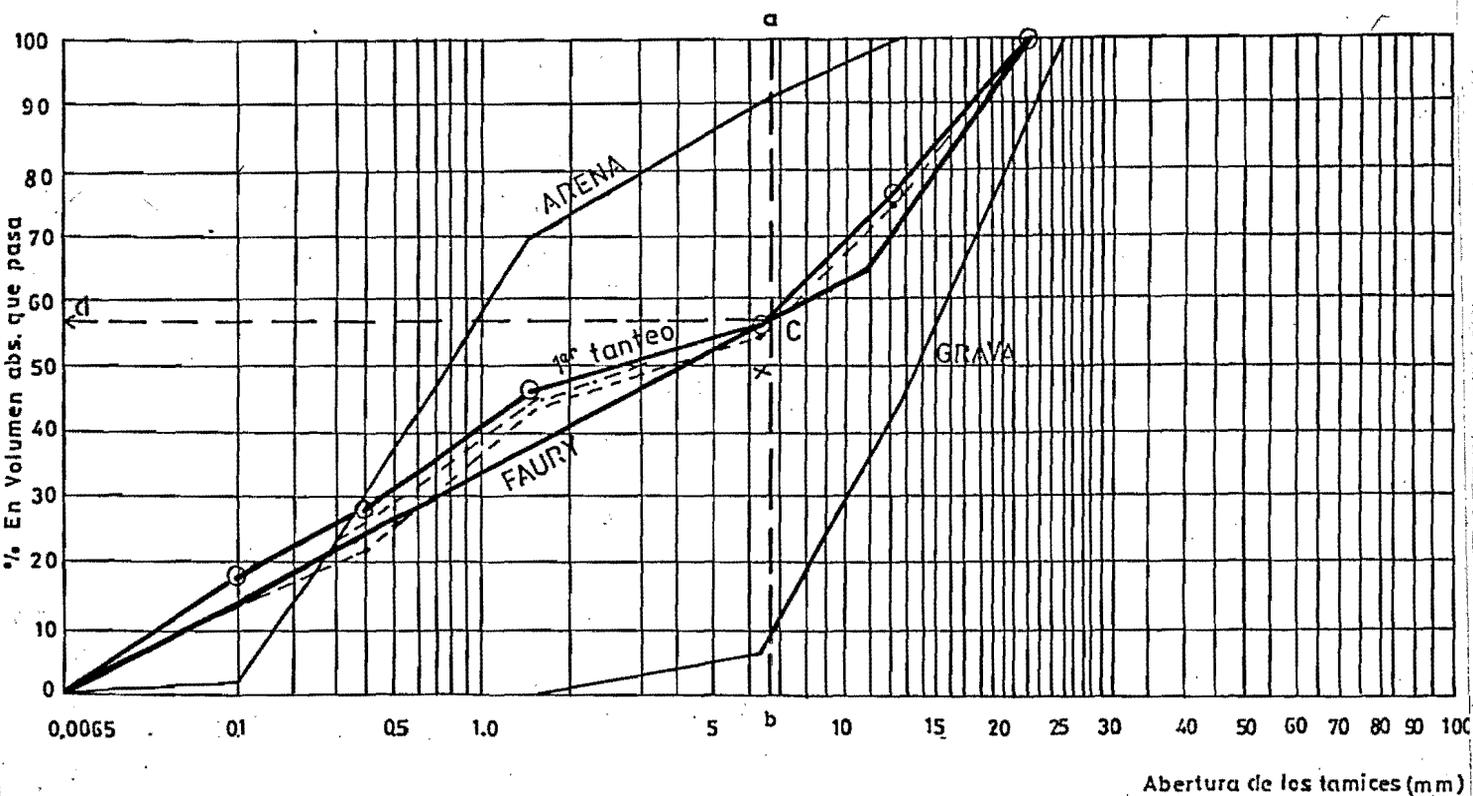


FIGURA 32.

Grafica del ejemplo de Faury

Resultados aproximadamente iguales al método por tanteos.

- Por índices Ponderables: el hormigón de referencia está compuesto de un conjunto de partículas de tamaños entre 0,0065 mm. y $D/2$ en una proporción de 66,43% y de otro conjunto de partículas de tamaños entre $D/2$ y D en proporción 33,57%. Utilizando la figura 25 hallamos los

Ip así:

Tamaño	Ip
0,1 - 11 mm.	0,630
11 mm. - 22 mm.	0,175

El índice ponderal del hormigón de referencia es:

$$I_1 = 0,6643 \times 0,630 + 0,3357 \times 0,175 = 0,478 \quad (1)$$

El índice ponderal de la arena: $I_a = ?$

Tamaño	Ip (Tabla 26.)	% pasa acumul/100
< 0,1	1,0	0,02
0,1 - 0,4	0,790	0,28
0,4 - 1,6	0,695	0,40
1,6 - 6,3	0,390	0,20
6,3 - 12,5	0,240	0,10

$$I_a = 1,0 \times 0,02 + 0,790 \times 0,28 + 0,695 \times 0,40 + 0,390 \times 0,20 + 0,240 \times 0,10 = 0,621$$

El índice ponderal de la grava: $I_g = ?$

Tamaño	Ip (Tabla 26.)	% pasa acumulado/100
1,6 - 6,3 mm	0,390	0,07
6,3 - 12,5 mm	0,240	0,37
12,5 - 22,0 mm	0,175	0,56

$$I_g = 0,390 \times 0,07 + 0,240 \times 0,370 + 0,175 \times 0,560 = 0,214$$

El índice ponderal del hormigón a fabricar, I_2 , será:

$$I_2 = 0,17 \times 1,0 + aI_a + gI_g = 0,17 \times 1,0 + 0,621a + 0,214g \quad (2)$$

como el hormigón a fabricar debe tener el mismo índice ponderal del hormigón de referencia es decir (1) = (2)

$$0,17 + 0,621a + 0,214g = 0,478 \quad (3)$$

además $0,17 + a + g = 1 \quad (4)$

de (4) $g = 0,83 - a$; reemplazando en (3) \Rightarrow

$$0,17 + 0,621a + 0,214(0,83 - a) = 0,478$$

$$\therefore a = 0,319 \approx 0,32$$

$$y \quad g = 0,511 \approx 0,51$$

La mezcla obtenida será:

Tamiz (mm.)	% que pasa acumulado			Suma
	Cemento	Arena	Grava	
25	17	32	51	100
12,5	17	32	32	71,4
6,3	17	28,8	3,6	49,4
1,6	17	22,4	0,0	39,4
0,4	17	9,6	0,0	26,6
0,1	17	0,6	0,0	17,6

Esta es la mezcla que más se ajusta a la curva de referencia; por lo tanto adoptaremos estos últimos porcentajes para el diseño.

5.3.10 Proporciones iniciales:

Peso de cemento = 419 Kgf

Peso de arena saturada superficialmente seca =
 $0,32 \times (1000 - 218) \times 2,62 = 656 \text{ Kgf}$

Peso de grava saturada superficialmente seca =
 $0,51 \times (1000 - 218) \times 2,58 = 1029 \text{ Kgf}$

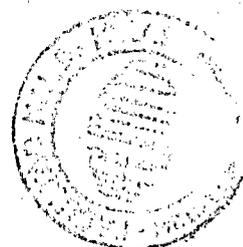
Peso de agua = 218 Kgf

Agua	Cemento	Arena sss	Grava sss
218 Kgf	419 Kgf	656 Kgf	1029 Kgf
0,52 ;	1	1,57	2,46 en peso

5.3.11 Las revisiones y correcciones son análogos al método del A.C.I.

PARTE TRES

ENSAYO DE MATERIALES*



* Nota: El objetivo de este capítulo no es el de suministrar información completa acerca de los ensayos de los materiales; para ello se está trabajando actualmente en la redacción de un libro que trata extensamente este tema. Lo que se pretende con esta parte es dar un esquema simple y resumido de todos los ensayos de materiales y del hormigón, que se requieren para un correcto manejo, control y dosificación de las mezclas.

Con esta información se puede, entonces, consultar las normas correspondientes de la A.S.T.M. o Icontec.

6. ENSAYOS DE CEMENTOS AGREGADOS Y HORMIGON

6.1 El cemento: con el nombre genérico de cementos designamos a todos aquellos materiales que tienen la propiedad de unir fragmentos sólidos individuales mediante una serie de reacciones químicas entre el material y el agua. A los que me voy a referir en esta parte es principalmente a los Portland por ser los más utilizados hoy en día en el hormigón. Para verificar la calidad del cemento Portland que se utiliza en el hormigón se deben realizar las siguientes pruebas de laboratorio especificados por el A.S.T.M. C150 (Icontec 121 y 321) y verificar si cumplen los requisitos mínimos exigidos en las normas.

6.1.1 Finura con el permeabilímetro de Blaine A.S.T.M. C-204 (Icontec 33)

6.1.2 % aire del mortero: A.S.T.M. C-185 (?)

6.1.3 Tiempos de fraguado, por Vicat: A.S.T.M. C-191 (Icontec 224)

6.1.4 Expansión en la autoclave: A.S.T.M. C-151 (Icontec 107).

6.1.5 Resistencia a la compresión: A.S.T.M. C-109 (Icontec 220*).

6.1.6 Falso fraguado: A.S.T.M. C-451 (Icontec 297).

6.1.7 Análisis Químico: A.S.T.M. C-114 (Icontec 321).

* Exactamente la norma Icontec 220 no es la misma que la A.S.T.M. C-109 ya que esta última utiliza para el cálculo del agua una relación agua-cemento constante e igual a 0,485 para los cementos Portland; y para otros cementos la prueba de fluidez determina el agua. La norma Icontec 220 no distingue entre los Portland y otros cementos y a todos les aplica la prueba de fluidez.

Un cemento será rechazado si no cumple con alguno de los registros exigidos en la norma A.S.T.M. C-150 (Icontec 321 y 121), siendo verificado por tres laboratorios oficialmente reconocidos y aceptando los resultados de dos laboratorios con datos similares. Las especificaciones son:

Norma de Ensayo		Especificación Portland I	
Colombiana Norteamericana		Colombiana	Norteamericana
33	C - 204	$\geq 2800 \text{ cm}^2/\text{gf}$	$\geq 2800 \text{ cm}^2/\text{gf}$
224	C - 185	?	$\leq 12\%$
118	C - 191	Tfi* > 45 min.	Tfi > 45 min
		Tgg* < 8 horas	Tff < 8 horas
107	C - 151	$\leq 0,8\%$	$\leq 0,8\%$
220	C - 109	$R_{3d}^{**} \leq 80 \text{ Kgf/cm}^2$	$\leq 124 \text{ Kgf/cm}^2$
		$R_{7d} \geq 150 \text{ "}$	$\geq 193 \text{ "}$
		$R_{28d} \geq 240 \text{ "}$	$\geq 280 \text{ "}$
297	C - 451	$\geq 50\%$	$\geq 50\%$

6.2 Agregados: al igual que el cemento los agregados deben cumplir las exigencias recomendadas en la norma A.S.T.M. C - 33 (Icontec 174). Se deben realizar los siguientes ensayos para verificar las características del material.

6.2.1 Muestreo de agregados para hormigón = A.S.T.M. D-75 Icontec 129.

6.2.2 Impurezas orgánicas y sus efectos = A.S.T.M. C-40 y 87 Icontec 127 y 579.

6.2.3 Partículas menores que 75 μ = A.S.T.M. C-117 Icontec 78.

* Tfi = tiempo de fraguado inicial; Tff: tiempo de fraguado final.

** R_{3d} , R_{7d} , R_{28d} : resistencia a la compresión del cemento a 3,7 y 28 días.

- 6.2.4 Partículas deleznales = A.S.T.M. C-142 Icontec 177 y 589.
- 6.2.5 Partículas livianas = A.S.T.M. C-123 Icontec 130.
- 6.2.6 Partículas reactivas = A.S.T.M. C-289 Icontec 175.
- 6.2.7 Análisis granulométrico = A.S.T.M. C-136 Icontec 77.
- 6.2.8 Densidades y % absorción = A.S.T.M. C-127 y 128 Icontec 176 y 237.
- 6.2.9 Pesos unitarios = A.S.T.M. C-29 Icontec 92.
- 6.2.10 Humedad = A.S.T.M. C-566 y C-70 Icontec ?.
- 6.2.11 Sanidad = A.S.T.M. C-88 Icontec 126.
- 6.2.12 Resistencia al desgaste = A.S.T.M. C-535 y C-131 Icontec 93 y 98.
- 6.3 El hormigón: los ensayos para el control de la calidad del hormigón en estado fresco y estado endurecido son:
- 6.3.1 Muestreo del hormigón fresco = A.S.T.M. C-172 Icontec 454.

- 6.3.2 Prueba de asentamiento = A.S.T.M. C-143 Icontec 396.
- 6.3.3 Peso unitario y rendimiento = C-138 Icontec ?
- 6.3.4 % de aire = A.S.T.M. C-138 y C-231 Icontec 1028 y 1032.
- 6.3.5 Tiempo de fraguado = A.S.T.M. C-403 Icontec 840.
- 6.3.6 Exudación = A.S.T.M. C-232 Icontec 1294.
- 6.3.7 Aditivos químicos = A.S.T.M. C-494 Icontec 1299.
- 6.3.8 Refrentado de cilindros = A.S.T.M. C-617 Icontec 904.
- 6.3.9 Ensayo de compresión = A.S.T.M. C-39 Icontec 673.
- 6.3.10 Toma de cilindros en obra = A.S.T.M. C-31 Icontec 550.
- 6.3.11 Toma de cilindros en Laboratorio = A.S.T.M. C-192
Icontec 1377.
- 6.3.12 Ensayos acelerados = A.S.T.M. C-684 Icontec 1513.
- 6.3.13 Resistencia a flexión = A.S.T.M. C-293 y C-78 Icon-
tec

6.3.14 Resistencia a la penetración = A.S.T.M. C-803 Icon-
tec ?

6.3.15 Resistencia al desprendimiento = A.S.T.M. C-900
Icontec ?

6.3.16 Velocidad de Pulso = A.S.T.M. C-597 Icontec ?

6.3.17 Número de rebote = A.S.T.M. C-805 Icontec ?

6.3.18 Ensayo brasilero = A.S.T.M. C-496 Icontec 722.

6.3.19 Módulos del hormigón = A.S.T.M. C-469 Icontec ?

6.3.20 Núcleos de hormigón = A.S.T.M. C-42 Icontec ?

REFERENCIAS BASICAS

1. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, A.C.I. Manual of concrete practice. Part 1, Materials and general properties of concrete, 1986.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual book of A.S.T.M. standards section 4. Volume 04-02. Concrete and mineral aggregates, 1983. 890p.
3. ARREDONDO, F. Dosificación de hormigones. Manuales y normas del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento, 2ª edición. Madrid 1969, pp9-102.
4. CORMON, Pierre. Fabricación del hormigón.
5. GARCIA BALADO, Juan F. Método para la dosificación de hormigones. Comité de la industria del cemento de la Andi, Medellín, 1968. 120p.
6. GARCIA MORENO, Gabriel. Control Estadístico de la calidad del hormigón, Universidad Nacional de Colombia, Medellín 1982. 22p.
7. GONZALEZ U. Edgar, ZAPATA Y. Eulices. Regresiones y Correlaciones entre la resistencia del hormigón temprana y la de 28 días: Ensayos de actualización. Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín 1987.
8. ICONTEC, Normas Técnicas Colombianas para la construcción, 3ª edición 1982. 380p.
9. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Práctica recomendable para dosificar concreto normal y concreto pesado, 1977. Traducción autorizada del documento A.C.I. 211.1. 77.
10. MAYOR GONZALEZ, Gerardo. Materiales de Construcción, serie Schaum de M^CGraw Hill. México 1974. pp103-258.

11. MINDESS SIDNEY, YOUNG, J. Francis. Concrete, Ed. Prentice, Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. 1981.
12. NEVILLE, Adam. Properties of concrete, Ed. Pitman Publishing Ltd. Marshfield, Londres. Massachusetts 1981.
13. POPOVICS, Sándor. Fundamentals of portland Cement concrete: A Quantitative Approach. Vol. 1. Fresh Concrete. Drexel, Univ. 1982. 477p.

REFERENCIAS ADICIONALES

14. NEVILLE, Adam. Properties of concrete, An Overview. Concrete International A.C.I. febrero de 1986.
15. NASSER K.W., KENYON J.C. Why not 3 x 6 inch Cylinders for testing concrete compressive strength? Journal A.C.I. Enero, febrero de 1984.
16. ABRAMS A. Duff. "Design of concrete Mixtures". Bulletin I Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Chicago. Illinois 1918.
17. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building Code Requirements for reinforced Concrete (A.C.I. 318-83).
18. GARCIA MESEGUER, Alvaro. Panorama Europeo Actual del control de calidad del hormigón. Informes de la construcción No. 257 del Instituto Eduardo Torroja, 1974.
19. JERATH SUKHRARS, KABBINI A., Isam. "Computer-Aided Concrete Mix proportioning. Journal A.C.I. Julio Agosto de 1983.
20. POPOVICS Sándor. Generalization of the Abrams' Law-Prediction of strength development of concrete from Cement Properties. Journal A.C.I. Marzo - Abril 1981.
21. POWERS T.C. the properties of fresh concrete. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1968.
22. DUNAGAN W.M. the application of some of the newer concepts to the design of concrete Mixes. Proc. A. C.I., 36, 1940.

23. GOLDBECK, A.T. GRAY J.E. A Method of Proportioning concrete for strength, workability, and durability. Bulletin No. 11, National crushed stone Association, Washington, D.C. 1949.
24. GIRALDO BOLIVAR, Orlando; CABALLERO NARVAES J. Joaquín. Correlación entre el ensayo de humedad en el agregado fino mediante alcohol en obra y humedad medida en el laboratorio. Proyecto de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 1981.
25. VENUAT MICHEL, PAPADAKIS NICHEL. Control y ensayo de cementos, Morteros y hormigones. Ed. Urmo. Bilbao, 1966.
26. POPOVICS Sándor, Strength Relationships for fly Ash concrete. Journal A.C.I. Enero, Febrero 1982.
27. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Fly Ash, Silica Fume, slag & other Mineral by - Products in concrete. Vol. I. S.P.79. Detroit 1983.
28. KELLY, J.W. and POLIVKA M. Ball test for fiel control of concrete consistency. A.C.I. Journal. Proc. Mayo 1955.
29. NASSER, K.W. and MAN Ma C. New Workability and compacting apparatus for concrete. A.C.I. Journal. Proc. Septiembre 1969.
30. NASSER K.W. and REZK, N.M. New Probe for testing Workability and compaction of fresh concrete. A.C.I. Journal. Proc. Mayo 1972.
31. HUMMEL ALFRED. Prontuario del hormigón. Ed. Urmo. Bilbao. 1968.
32. RUIZ, JAIME A. y URIBE, GUILLERMO. Dosificación de mezclas de hormigones por diferentes métodos, Estudio comparativo y programación. Proyecto de grado, Ingeniería Civil, 1982