

# CONTROL TÉCNICO PARA MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO

Javier Alfonso Cárdenas Gutiérrez  
Nelson Javier Cely Calixto  
Laura Elena Martínez Celis



Universidad Francisco  
de Paula Santander  
Vigilada Mineducación





# **CONTROL TÉCNICO PARA MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO**

JAVIER ALFONSO CÁRDENAS GUTIERREZ  
NELSON JAVIER CELY CALIXTO  
LAURA ELENA MARTÍNEZ CELIS

Cárdenas Gutiérrez, Javier Alfonso, autor

Control técnico para mezclas de concreto hidráulico / Javier Alfonso Cárdenas Gutiérrez, Nelson Javier Cely Calixto, Laura Elena Martínez Celis. -- Primera edición. -- San José de Cúcuta : Universidad Francisco de Paula Santander ; Bogotá : Ecoe Ediciones, 2022. 96 páginas. (Ingeniería y afines. Ingeniería civil)

Incluye bibliografía

ISBN 978-958-503-439-6 -- 978-958-503-440-2 (e-book)

1. Hormigón premezclado - Control integrado 2. Agregados (Materiales de construcción) 3. Cemento 4. Mezclas I. Cely Calixto, Nelson Javier, autor II. Martínez Celis, Laura Elena, autor

CDD: 666.893 ed. 23

CO-BoBN- a1100500

---



**Área:** Ingeniería y afines

**Subárea:** Ingeniería civil



**Universidad Francisco  
de Paula Santander**

Vigilada Mineducación

© Javier Alfonso Cárdenas Gutierrez

© Nelson Javier Cely Calixto

© Laura Elena Martínez Celis

© Universidad Francisco  
de Paula Santander  
Avenida Gran Colombia  
No. 12E-96, Barrio Colsag  
San José de Cúcuta - Colombia  
Teléfono: 607 577 6655

► Ecoe Ediciones S.A.S.  
info@ecoeediciones.com  
www.ecoeediciones.com  
Carrera 19 # 63 C 32 - Tel.: 919 80 02  
Bogotá, Colombia

**Primera edición:** Bogotá, octubre del 2022

**ISBN:** 978-958-503-439-6

**e-ISBN:** 978-958-503-440-2

Directora editorial: Claudia Garay Castro  
Coordinadora editorial: Paula Bermúdez B.  
Corrección de estilo: Dennis Valeria Acevedo  
Diagramación: Magda Rocío Barrero  
Carátula: Wilson Marulanda Muñoz  
Impresión: Xpress Estudio Gráfico y digital  
Carrera 69 H # 77 - 40

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio  
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

*Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados*

# CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1. HISTORIA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2. LOS CEMENTANTES.....</b>	<b>5</b>
2.1. Historia .....	5
2.2. Proceso de fabricación del cemento .....	6
2.2.1. Trituración .....	7
2.2.2. Mezcla .....	8
2.2.3. Molienda.....	8
2.2.4. Homogeneización.....	9
2.2.5. Calcinación.....	10
2.3. Tipos de cementantes calcáreos.....	10
2.4. Propiedades químicas .....	11
2.4.1. Composición.....	11
2.5. Hidratación y calor de hidratación .....	13
2.6. Propiedades físicas .....	13
2.6.1. Densidad.....	13
2.6.1.1. Determinación de la densidad según la NTC 221 .....	14
2.6.2. Masa unitaria .....	15
2.6.2.1. Determinación de la masa unitaria suelta .....	16
2.6.3. Finura y granulometría del cemento.....	17
2.6.3.1. Determinación de la finura del cemento según la NTC-33.....	18

2.6.4. Consistencia normal .....	19
2.6.4.1. Determinación de la consistencia normal según la NTC 110.....	19
2.6.5. Fraguado.....	22
2.6.5.1. Determinación del tiempo de fraguado según la NTC-118.....	22
2.6.6. Falso fraguado.....	23
2.6.6.1. Determinación del falso fraguado del cemento según la NTC-297.....	23
2.6.2. Sanidad del cemento .....	24
2.6.2.1 Determinación de la expansión del cemento según la NTC-107.....	24
2.6.8. Fluidez.....	26
2.6.8.1. Fluidez de morteros de cementos según la NTC-111 ....	28
2.6.9. Contenido de aire .....	28
2.6.9.1. Ensayo para determinar el contenido de aire según la NTC-224.....	29
2.7. Propiedades mecánicas .....	29
2.7.1. Resistencia a la compresión.....	29
2.7.1.1. Determinación de la resistencia a la compresión según la NTC-220.....	30
2.7.2. Resistencia a la tracción directa.....	31
2.7.2.1. Determinación de la resistencia a tracción del cemento .....	31
2.7.3. Resistencia a la tracción por flexión.....	31
2.7.3.1. Determinación de la resistencia a tracción por flexión según la NTC-120.....	32
<b>CAPÍTULO 3. AGREGADOS .....</b>	<b>33</b>
3.1. Importancia en el concreto .....	34
3.2. Clasificación.....	35
3.2.1. Tamaño de las partículas .....	35
3.2.2. Según su forma .....	35
3.2.3. Según su textura.....	36
3.2.4. Método de extracción .....	36
3.2.5. Densidad.....	37
3.3. Propiedades químicas de los agregados .....	39
3.3.1. Reacción álcali-agregado .....	39
3.4. Propiedades mecánicas .....	40
3.4.1. Resistencia .....	40
3.4.2. Dureza.....	40
3.4.3. Tenacidad .....	40

3.4.4. Adherencia .....	41
3.5. Propiedades físicas .....	41
3.5.1. Impureza .....	41
3.5.1.1. Ensayo de porcentaje de lodos según la NTC-78 .....	43
3.5.1.2. Ensayo de impurezas orgánicas según la NTC-127.....	45
3.5.2. Distribución granulométrica .....	46
3.5.2.1. Determinación de la granulometría de un agregado según la NTC-77.....	50
3.5.3. Densidad y absorción.....	51
3.5.3.1. Ensayos en arenas según la NTC-237.....	52
3.5.3.2. Ensayos en gravas según la NTC-176.....	55
3.5.4. Masas unitarias y porcentaje de vacíos.....	55
3.5.4.1. Procedimiento .....	56
3.5.5. Humedad superficial.....	57
3.5.5.1 Método de secado a temperatura constante según la NTC-1776 .....	57
3.5.6. Humedad superficial por frasco volumétrico.....	58
3.5.7. Humedad superficial secada con alta intensidad.....	58
3.5.8. Humedad superficial por quemado con alcohol.....	59
3.5.9. Humedad superficial en probetas .....	60
<b>CAPÍTULO 4. MEZCLAS.....</b>	<b>61</b>
4.1. Diseño de mezclas de concreto.....	61
4.1.1. Método ACI 211.1 .....	61
4.1.1.1. Datos iniciales.....	62
4.1.1.2. Experiencia en el diseño de mezclas.....	64
4.1.1.3. Características del ambiente y dimensiones de la estructura.....	65
4.1.1.4. Características de los materiales .....	66
4.1.1.5. Dosificación inicial .....	68
4.1.1.6. Mezclas de prueba.....	72
4.1.1.7. Corrección por asentamiento y densidad del concreto .	73
4.1.1.8. Corrección por resistencia .....	75
4.1.2. Método Weymouth y Fuller .....	77
4.1.2.1. Recopilación de datos .....	78
4.1.2.2. Dosificación inicial.....	78
4.1.2.3. Mezcla de prueba - corrección por humedad .....	80
4.1.2.4. Corrección por asentamiento.....	81
4.1.2.5. Corrección por resistencia.....	82
<b>CAPÍTULO 5. EJERCICIO .....</b>	<b>85</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>91</b>





# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gran Pirámide de Guiza.....	2
Figura 2. La Gran Muralla China .....	2
Figura 3. Panteón de Agripa.....	3
Figura 4. Coliseo Romano .....	4
Figura 5. Cemento .....	6
Figura 6. Proceso de fabricación de cementos calcáreos.....	7
Figura 7. Trituración primaria .....	8
Figura 8. Molino de bolas .....	8
Figura 9. Basas de homogenización .....	9
Figura 10. Silos .....	9
Figura 11. Horno rotatorio inclinado.....	10
Figura 12. Frasco volumétrico Le Chatelier .....	14
Figura 13. Pisón.....	15
Figura 14. Recipiente con masa y volumen conocido.....	16
Figura 15. Medidos de la finura del cemento Blaine.....	18
Figura 16. Mezcladora mecánica .....	20
Figura 17. Moldeado y compactación.....	20
Figura 18. Equipo de Vicat .....	21

Figura 19. Cámara húmeda .....	23
Figura 20. Barras primaticas de cemento .....	25
Figura 21. Comparador de longitud.....	25
Figura 22. Autoclave.....	26
Figura 23. Mesa de fluidez del concreto .....	27
Figura 24. Resistencia a la compresión .....	30
Figura 25. Moldes .....	30
Figura 26. Ensayo de resistencia a tracción por flexión.....	32
Figura 27. Agregados.....	33
Figura 28. Agregados naturales.....	37
Figura 29. Clínker .....	37
Figura 30. Magnetita .....	38
Figura 31. Pumita.....	38
Figura 32. Granito.....	39
Figura 33. Terrones de arcilla .....	42
Figura 34. Pirita de hierro.....	42
Figura 35. Mica .....	43
Figura 36. Tamices usados en el ensayo.....	43
Figura 37. Cuarteo del material .....	44
Figura 38. Escala de color según el estándar Gardner .....	46
Figura 39. Estudio granulométrico.....	47
Figura 40. Curva de Fuller .....	49
Figura 41. Muestra húmeda.....	53
Figura 42. Muestra seca.....	53
Figura 43. Muestra con la saturación requerida .....	54
Figura 44. Algoritmo para el diseño de mezclas según el método ACI 211.1	62
Figura 45. Efecto de la compactación en la resistencia del concreto .....	64
Figura 46. Relación entre $f'c$ y $f'cr$ .....	65

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Clasificación de los cementantes de manera general .....	5
Tabla 2.	Evolución de los cementos calcáreos .....	6
Tabla 3.	Tipo de cemento según la norma ASTM C150.....	10
Tabla 4.	Compuestos anhidros.....	11
Tabla 5.	Óxidos encontrados dentro del cemento Portland.....	11
Tabla 6.	Compuestos anhidros del cemento.....	12
Tabla 7.	Porcentaje de composición química de los diferentes tipos de cemento Portland.....	13
Tabla 8.	Porcentaje de fluidez.....	27
Tabla 9.	Densidad de diferentes tipos de rocas .....	35
Tabla 10.	Clasificación de los agregados.....	35
Tabla 11.	Textura superficial de los agregados.....	36
Tabla 12.	Rocas potencialmente reactivas .....	39
Tabla 13.	Resistencia a la compresión de rocas comunes en agregados .....	40
Tabla 14.	Rango de tamaño de las impurezas.....	41
Tabla 15.	Cantidad mínima de agregado .....	44
Tabla 16.	Cantidad máxima de partículas menores al tamiz n.º 200 .....	44
Tabla 17.	Valores de contenido de materia orgánica en el agregado fino.....	45

Tabla 18. Designación de los tamices por el tamaño de las partículas ASTM .....	46
Tabla 19. Agregado fino que pasa según ASTM C-33 .....	48
Tabla 20. Parámetros para valor de “a” .....	50
Tabla 21. Cálculos granulométricos para agregados finos .....	50
Tabla 22. Cálculos granulométricos para agregados gruesos.....	51
Tabla 23. Recipientes para medida de la masa unitaria en agregados .....	56
Tabla 24. Valores de trabajabilidad en las diferentes estructuras .....	63
Tabla 25. Valores máximos en la relación A/C .....	66
Tabla 26. Relación entre la resistencia del cemento y las constantes k1 y k2 .....	67
Tabla 27. Valores aproximados de agua de mezclado y el contenido de aire.....	68
Tabla 28. Relación entre la A/C y la resistencia a la compresión.....	69
Tabla 29. Volumen de agregados grueso seco y compactado con varilla .....	69
Tabla 30. Volúmenes de agregado grueso seco y compactado con varilla ....	70
Tabla 31. Datos iniciales del cemento .....	85
Tabla 32. Datos iniciales de la arena.....	85
Tabla 33. Datos iniciales de la grava.....	86
Tabla 34. Proporciones iniciales.....	87
Tabla 35. Dosificación .....	87
Tabla 36. Correcciones por asentamiento y densidad.....	88
Tabla 37. Dosificación final .....	89
Tabla 38. Correcciones por resistencia.....	89

## CAPÍTULO 1

# HISTORIA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO

El concreto cuenta con una historia muy antigua, la cual se desarrolló a partir de descubrimientos, experimentos e, incluso, de misterios, ya que en la actualidad existen grandes estructuras construidas por emperadores y reyes del pasado que la ingeniería contemporánea no puede explicar.

En la antigüedad, los cementos crudos eran hechos por medio de la trituración y el quemado de piedra caliza o yeso, la caliza está compuesta en su mayoría por cal. Estos ingredientes, al agregarle agua y arena, se convierten en un mortero, el cual se utilizaba al momento de adherir una piedra con otra.

Estos materiales fueron mejorando con el pasar de los años, incluso, combinándose con otros materiales, lo que llevó a la creación del concreto moderno. Las mejoras en los materiales están determinadas tanto por periodos históricos como por los descubrimientos de diferentes civilizaciones que han habitado el planeta.

- Egipto: aproximadamente para el año 3000 a.C., los egipcios utilizaban una mezcla de barro con paja para formar ladrillos, este material resulta tener más similitud con el aborto que con el mismo concreto, pero, aun así, también solían usar morteros de yeso y cal en las construcciones de las pirámides (Cuevas *et al.*, 2019).

**Figura 1. Gran Pirámide de Guiza**

Fuente: abc (2018).

Una de las construcciones reconocidas en la actualidad es la Gran Pirámide de Guiza, donde se utilizaron aproximadamente 500.000 toneladas de mortero, que sirvieron como material de cama para las piedras que forman la parte visible de la estructura.

- China: en la misma época que se construyó la Gran Pirámide de Guiza, los chinos contaban con un tipo de concreto diferente, el cual era elaborado con gluten. Este fue utilizado en estructuras chinas antiguas como la Gran Muralla China (Tostado, 2014).

**Figura 2. La Gran Muralla China**

Fuente: Mattes (2016).

- Roma: para el año 200 a.C. habían construido, de manera exitosa, el concreto, pero no como lo conocemos actualmente, era un material no plástico que no contaba con la propiedad de ser moldeable, similar a escombros cementados. La mayoría de las construcciones de los romanos se realizaban apilando piedras de diversos tamaños y rellenando los espacios con mortero, el cual era un simple cemento de piedra caliza que se iba endureciendo, con lentitud, por medio de la reacción con el dióxido de carbono presente en el aire, lo que lo convertía en un mortero débil.

**Figura 3. Panteón de Agripa**



Fuente: Rabax63 (2018).

Para las estructuras más reconocidas como en el Panteón de Agripa y el Coliseo Romano, hicieron un tipo de cemento con arena volcánica, la que combinaron con la cal y agua. Realizaban hidratación a esta mezcla para que se solidificara todo en una masa muy parecida a la de una roca. Además, usaron la grasa animal y leche como aditivos. Incluido a esto, aprendieron a fabricar la arcilla caolinítica calcinada y las piedras volcánicas calcinadas (Alvarez *et al.*, 1995).



**Figura 4. Coliseo Romano**

Fuente: Diliff (2007).

Con el pasar de los años, el ser humano ha utilizado el concreto para la elaboración de construcciones por medio del mejoramiento de las técnicas, aprendiendo sobre las propiedades de la resistencia y la impermeabilidad que consigue.

En la actualidad, se construye utilizando comúnmente el cemento *Portland*, que fue inventado alrededor del año 1820, el cual es una mezcla de concreto con otros aditivos. Los aditivos son productos químicos que controlan las propiedades del fraguado, además, pueden modificar el concreto para que resista condiciones ambientales extremas, ya sea por fuertes vientos, temperaturas altas, entre otros factores externos, como lo explica Del Cueto (2013).

## CAPÍTULO 2

# LOS CEMENTANTES

Los cementantes logran la combinación de todos los materiales, ya que pueden unir piezas sólidas individuales para formar una unidad robusta y compacta, capaz de soportar las cargas más pesadas.

Uno de los materiales aglutinantes o pegantes más conocidos, en el contexto de la construcción de obras, es el cementante calcáreo, que resulta de una mezcla de piedra caliza y arcilla. Este material tiende a reaccionar en presencia de agua.

**Tabla 1. Clasificación de los cementantes de manera general**

Tipo de cemento	Resistencia	Valor monetario
Asfálticos	Baja	Medio
Calcáreos	Media	Bajo
Epoxi	Alta	Alto

Fuente: elaboración propia.

### 2.1. Historia

La primera referencia que se tiene sobre el uso del pegante calcáreo es por los griegos y los romanos, los cuales, al inicio, solo usaban la caliza calcinada, pero, con el pasar del tiempo, le añadieron ceniza volcánica, piedra molida, arena y agua. En la antigüedad, los egipcios también utilizaban el yeso natural calcinado como pegante.

Fue hasta 1824 que el constructor J. Aspdin propuso el nombre del cemento *Portland*, el cual se deriva de la similitud que hay entre la piedra extraída de la península de Portland y el material endurecido. Esta piedra se utilizó en la mayoría de los edificios construidos en las primeras décadas del siglo XIX, cuando se empezó la fabricación de este tipo de cemento (Del Cueto, 2013).

**Figura 5. Cemento**



Fuente: Cemix (n.d.)

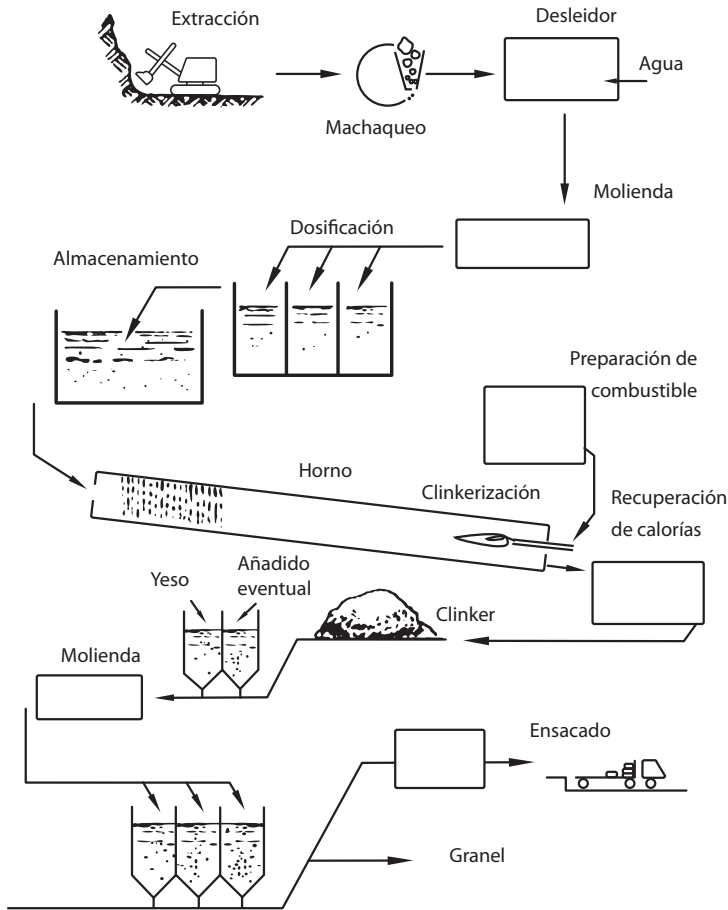
**Tabla 2. Evolución de los cementos calcáreos**

Época	Descripción
Edad media	Hay un retroceso en todos los estudios y usos de los cementos.
Siglo XVIII	Empiezan a aparecer los cementos calcáreos con el uso de la caliza calcinada.
1824	Por medio del calentamiento de la arcilla y la roca caliza, que es molida y pulverizada, Joseph Aspdin produjo el desarrollo del cemento Portland, que mediante este proceso logró que fraguar fuera mucho más rápido que con los demás cementos.
1845	Isaac Johnson creó el proceso de clínkerización.

Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Proceso de fabricación del cemento

El proceso de fabricación del cemento posee varias etapas: extracción, trituración, mezcla, homogeneización, calcinación, enfriamiento, clínker, almacenamiento, empaquetado y despacho. Este proceso se realiza en grandes plantas industriales.

**Figura 6. Proceso de fabricación de cementos calcáreos**

Fuente: Giraldo Bolívar (2003).

### 2.2.1. Trituración

Cuando se realiza la extracción de la caliza y la arcilla, que son la materia prima, se procede al proceso de trituración. Este es fundamental, ya que los materiales obtenidos en las canteras presentan un tamaño aproximado de 0,75 m.

La trituración se tiende a realizar en dos fases; la primera es donde los fragmentos de roca, con un diámetro aproximado de 1,5 m., pasan por la trituradora primaria hasta quedar con un tamaño menor a 150 mm; en la segunda fase, los fragmentos de piedra pasan por la trituradora secundaria, que puede ser un martillo de mayor velocidad o un molino giratorio, este proceso va a reducir el tamaño de las piedras entre 5 mm hasta 10 mm de diámetro.

**Figura 7. Trituración primaria**

Fuente: Interveira (s.f.).

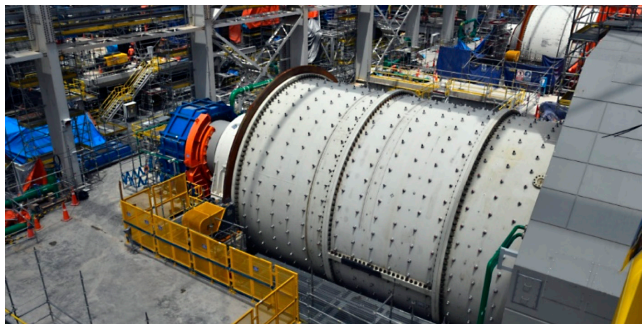
### **2.2.2. Mezcla**

En esta etapa se realiza una mezcla de caliza y arcilla, en las proporciones que cumplan con los requisitos exigidos para su composición. Después, la mezcla se almacena a granel, en donde se toman muestras para realizar los respectivos análisis químicos.

### **2.2.3. Molienda**

El proceso de molienda se realiza de dos formas, los cuales son:

- Proceso húmedo: teniendo ya realizada la premezcla, se va a transportar a los molinos de crudo por medio de unas bandas, en donde un gran cilindro giratorio, que cuenta con bolas metálicas, continua la trituración del material. Luego, se adiciona agua a la mezcla, lo que conformará un tipo de lodo, que se le llama pasta.

**Figura 8. Molino de bolas**

Fuente: AngloAmerican (2022).

- Proceso seco: se realiza el mismo procedimiento que en el proceso húmedo, pero sin agregarle agua, esto dará como resultado un polvo fino denominado harina.

### 2.2.4. Homogeneización

En esta parte se busca homogeneizar las partículas, el procedimiento depende del tipo de molienda.

- Proceso húmedo: se deben utilizar grandes tanques, llamados balsas, que van a impedir la sedimentación por medio de la agitación mecánica.

**Figura 9. Basas de homogeneización**



Fuente: Aguambiente (2005).

- Proceso seco: la homogeneización se realiza por medio de la agitación generada por aire a presión.

**Figura 10. Silos**



Fuente: Camelway Machinery (s.f.).

### 2.2.5. Calcinación

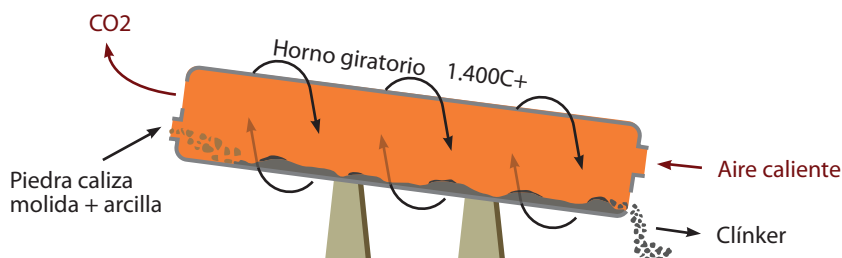
Esta etapa es la más importante, ya que aquí el cemento obtiene sus propiedades cementantes utilizando altas temperaturas, que pueden llegar hasta los 1500 °C.

En el caso del proceso seco, esta etapa se lleva a cabo después de la homogeneización, pero para el proceso húmedo existe un paso intermedio en donde se extrae el agua de la mezcla.

La calcinación se ejecuta en hornos rotatorios de longitud variada, que pueden llegar a tener hasta 150 m. de largo y 5 m. de diámetro.

Según Vilcatoma Vásquez (2019), para realizar este proceso, primero, se deposita la harina en la parte superior del horno, en donde desciende lentamente hasta llegar al fondo, que debe tener una temperatura aproximada de 1450 °C. En esta parte se forman gránulos de aproximadamente 20 mm de diámetro, a lo que se le conoce como el clínker. Después, el material se somete a un enfriamiento de manera brusca y, por último, se muele para obtener el cemento.

**Figura 11. Horno rotatorio inclinado**



Fuente: Rodgers (2018).

## 2.3. Tipos de cementantes calcáreos

Según la norma ASTM C150, existen 5 principales tipos básicos de cemento *Portland*.

**Tabla 3. Tipo de cemento según la norma ASTM C150**

Tipo de cemento	Descripción
Tipo I	Es de uso general, por ejemplo, para pavimentos, puentes, tanques, tuberías, entre otros.
Tipo II y II (MH)	Presenta resistencia al sulfato y al calor de hidratación moderada. Estos se utilizan en construcciones subterráneas o costeras.
Tipo III	Cuenta con alta resistencia inicial.

Tipo de cemento	Descripción
Tipo IV	Se suelen utilizar para minimizar la cantidad de calor generada por el proceso de hidratación. Su uso se presenta en estructuras de concreto masivo que durante el endurecimiento presenta altas temperaturas.
Tipo V	Su resistencia al sulfato es alta.

Fuente: elaboración propia.

## 2.4. Propiedades químicas

### 2.4.1. Composición

La mezcla del cemento *Portland* es compleja, ya que interactúan silicatos y aluminatos de calcio. Estos son los principales óxidos que se presentan:

- Alúmina: óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).
- Cal: óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ).
- Hierro: óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).
- Sílice: óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ).

Durante el proceso de calcinación estos óxidos se combinan entre sí para generar compuestos anhidros que resultan ser fundamentales en el cemento. Estos componentes se desarrollan gradualmente dentro de un horno rotatorio donde la materia prima alcanza hasta los  $1450^\circ\text{C}$ .

Tabla 4. Compuestos anhidros

Nombre	Fórmula	Compuesto
Aluminato tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Silicato tricálcico	$3\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$

Fuente: elaboración propia.

También hay otros componentes que se presentan en menor cantidad, los cuales son: Cal libre,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$  y  $\text{TlO}_2$ .

Tabla 5. Óxidos encontrados dentro del cemento Portland

Compuesto	Nombre	Porcentaje de cemento <i>Portland</i>	Porcentaje de cemento tipo I
Álcalis	Sodio y potasio	0,20 – 1,3	0,40
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alúmina	3 – 8	4,50



Compuesto	Nombre	Porcentaje de cemento <i>Portland</i>	Porcentaje de cemento tipo I
CaO	Cal	60 - 67	62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de hierro	0,50 - 6	3,50
SiO <sub>2</sub>	Sílice	17 - 25	21
MgO	Oxido de magnesio	0,10 - 40	1
SO <sub>3</sub>	Anhidrido sulfato	1 - 3	2

Fuente: elaboración propia.

Es importante tener en cuenta que el compuesto Álcalis puede llegar a reaccionar con otros agregados produciendo daños en el concreto, incluso provocando su desintegración.

**Tabla 6. Compuestos anhidros del cemento**

Nombre	Fórmula	Porcentaje en peso	Porcentaje en el tipo I
Aluminato tricálcico	3CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 15	6
Aluminoferrito tetracálcico	4CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 17	11
Silicato dicálcico	2CaOSiO <sub>2</sub>	5 - 50	21
Silicato tricálcico	3CaOSiO <sub>2</sub>	20 - 70	52

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 6, el silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S) y el tricálcico (C<sub>3</sub>S) llegan a formar entre el 70 y el 75 % del cemento.

El proceso de hidratación del C<sub>2</sub>S inicia después de 7 días y se puede prolongar durante varias semanas, mientras que el C<sub>3</sub>S se hidrata de 24 horas a 7 días, dado que la resistencia alta se consigue al séptimo día.

El aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) cuenta con una hidratación rápida porque después de las 24 horas inicia su alta resistencia. Este compuesto es inestable químicamente, ya que tiende a reaccionar con componentes de ambientes salinos, produciendo deterioro en el material.

El aluminoferrito tetracálcico (C<sub>4</sub>AF) ayuda únicamente en el proceso de calcinación y proporciona una baja resistencia al cemento.

**Tabla 7. Porcentaje de composición química de los diferentes tipos de cemento *Portland***

Tipo de cemento	Compuestos químicos (porcentaje en peso)			
	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
I	24 – 31	39 – 56	3 – 16	4 – 11
II	25 – 35	40 – 50	8	10 – 15
III	15 – 20	50 – 63	3 – 15	8 – 12
IV	40 – 50	25 – 35	7	10 – 15
V	38 - 48	32 – 42	5	10

Fuente: elaboración propia.

## 2.5. Hidratación y calor de hidratación

La hidratación se efectúa cuando el agua entra en contacto con el cemento, ocurriendo dos fenómenos: el endurecimiento y el fraguado.

En el fraguado ocurre la primera reacción química, donde el material aumenta de forma gradual su temperatura interior generando el calor de hidratación. En este proceso es importante controlar la temperatura porque, si no se disminuye adecuadamente, la evaporación rápida del agua y los cambios volumétricos crean tensión térmica y ocasionan daños graves en la estructura.

## 2.6. Propiedades físicas

### 2.6.1. Densidad

La densidad se define como la masa de un volumen unitario que se encuentra a una determinada temperatura. Se debe indicar de manera correcta en cuáles unidades se trabaja, ya sea en Kg/m<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup> o lb/pe<sup>3</sup>.

La densidad del cemento puro, sin contar adiciones especiales, está entre 3,10 y 3,2 Kg/m<sup>3</sup>, si se le adiciona escoria de alto horno aumentará hasta 7,35 Kg/m<sup>3</sup>, pero si se le agrega ceniza volante, la cual cuenta con una densidad de 2,4 Kg/m<sup>3</sup>, disminuirá la densidad del cemento. La intensidad del primer caso puede estar entre 3,2 y 3,4 Kg/m<sup>3</sup> y la del segundo caso entre 2,8 y 3 Kg/m<sup>3</sup>, todo esto depende de cuanta cantidad de adiciones posee el cemento.

El valor de la densidad se encuentra en el diseño de mezclas, ya que, si se cuenta con baja densidad y se acompaña con una alta finura, el cemento tendrá reacciones puzolánicas.

Para medir esta propiedad se cuentan con métodos simples, como los de desplazamientos de líquidos y gases, que dan un valor aproximado, y con métodos

complejos, como la difracción y los rayos X, los cuales se justifican por medio de trabajos de investigación.

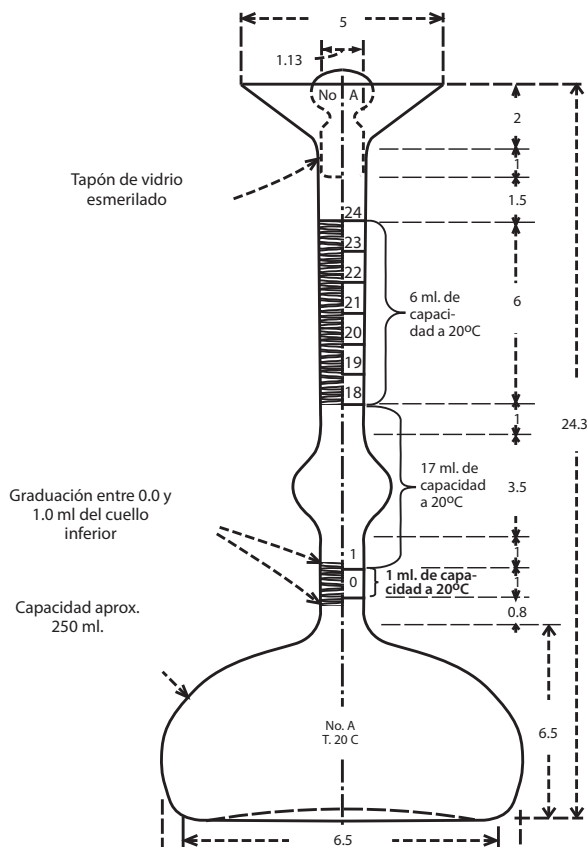
Algunos de los métodos que se usan son:

- Método de la balanza termogravimétrica.
- Ensayos con el índice de refracción.
- Método de Lorents y Lorents.
- Utilización de rayos X.

### 2.6.1.1. Determinación de la densidad según la NTC 221

La Norma Técnica Colombiana (NTC) 221 (1999) explica el procedimiento en el que se puede determinar la densidad con el método de desplazamiento de líquidos, que se realiza por medio del volumétrico de Le Chatelier.

**Figura 12. Frasco volumétrico Le Chatelier**



Fuente: Giraldo Bolivar (2003).

El procedimiento inicia introduciendo 1 ml de líquido en el frasco de Le Chatelier, luego se llenará de agua a una temperatura aproximada de 21 °C para lograr que el nivel se estabilice ( $V_o$ ). Después, se introduce en el frasco una muestra de 64 g, aproximadamente, del cemento y se realiza el mismo procedimiento. Con esto se determina el volumen final ( $V_f$ ) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1999).

Con los valores obtenidos se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad: } \delta = \frac{64 \text{ g}}{(V_f - V_o) \text{ ml}}$$

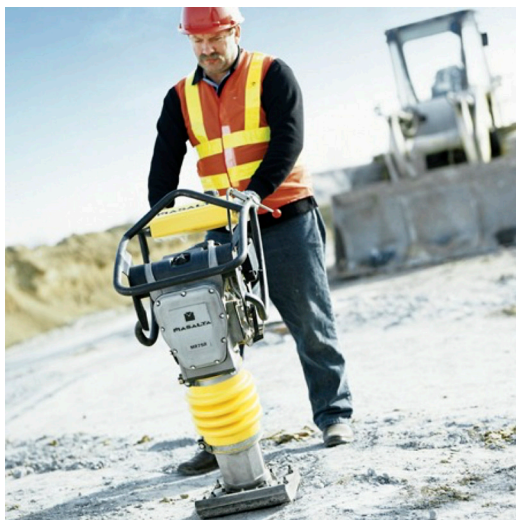
### 2.6.2. Masa unitaria

La masa unitaria es la relación entre la masa sólida de un material ( $M_s$ ) y el volumen que este ocupa ( $V_r$ ), estando en dos condiciones: seca y suelta.

La masa unitaria muestra cuál es el valor necesario para proporcionar agregados a una mezcla de concreto. Las unidades de masa también se usan para determinar las relaciones entre masa y volumen para el concreto (Ospina Lozano *et al.*, 2017).

- **Masa unitaria compactada:** se utiliza energía de compactación por medio de un pisón estándar para que las partículas se acomoden en el molde.

Figura 13. Pisón



Fuente: Ormac (2021).

- **Masa unitaria suelta:** en este caso no se necesita utilizar energía. Además, dependiendo la finura, forma y distribución de cada grano del material cuentan con un grado de empaque.

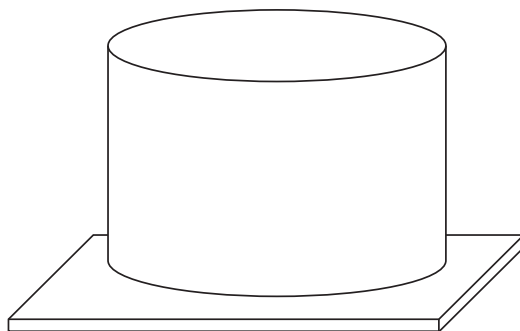
- **Masa unitaria compactada con vibración:** para conseguir el acomodamiento de las partículas se necesita utilizar un equipo de vibración mecánico.

### 2.6.2.1. Determinación de la masa unitaria suelta

La masa unitaria suelta se determina por el método de paleo, que utiliza el siguiente procedimiento:

Primero, se determina la masa de la caja y se llena, de modo que el agregado se descargue desde una altura de 50 mm por encima del borde. Luego, se aplana la superficie y se pesa el recipiente lleno. Esta actividad se repite tres veces para determinar el promedio.

**Figura 14. Recipiente con masa y volumen conocido**



Fuente: elaboración propia.

Por último, se determina la masa del conjunto ( $M_c$ ) teniendo en cuenta lo siguiente:

- $M_r$ : masa del molde.
- $M_c$ : masa del molde + masa del cemento (g).
- $V_r$ : volumen de molde (ml).
- $\delta$ : densidad del cemento ( $Mg/m^3$ ).

Las fórmulas para usar son:

- Masa unitaria: 
$$MU = \frac{M_c - M_r}{V_r}$$
- Volumen de vacío: 
$$V_v = V_s * \frac{(\delta - MU)}{MU}$$
- Relación de vacíos: 
$$R_v = \frac{V_v}{V_T} * 100$$

### **2.6.3. Finura y granulometría del cemento**

La finura se define como el tamaño promedio que las partículas del cemento alcanzan después del clinker con el yeso.

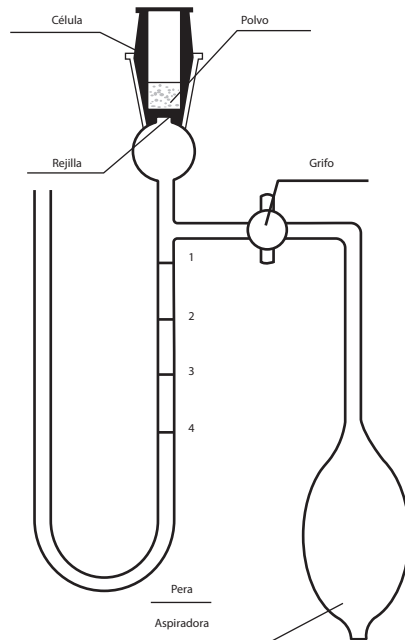
La velocidad de hidratación depende principalmente del grado de finura del cemento. Si hay mayor finura, una parte más grande la superficie tendrá reacciones químicas. Sin embargo, con un alto grado de finura se obtiene un desarrollo rápido de resistencia.

La finura se puede determinar por medio de múltiples procesos: en algunos se utiliza el tamizado con malla electrosoldada, el cual puede brindar datos en partículas menores de 20 micrómetros; en otros métodos se usa la permeabilidad, en estos se pueden medir superficies específicas del material, como el *Blaine*.

El método más fácil para desarrollar la permeabilidad es el *Blaine*, tiene una característica técnica en la que el cemento alcanza la sofisticación apropiada si el valor del resultado es mayor o igual a 280 m<sup>2</sup>/kg.

La finura es una de las propiedades más importantes, por eso se debe tener un control riguroso, evitando que el cemento presente efectos adversos. También es importante tener en cuenta que un mayor grado de finura conlleva a que los costos de producción y control de la molienda final del clinker con el yeso aumenten, además, también puede afectar de las siguientes formas:

- Hace que cambie la cantidad necesaria de agua al momento de preparar el mortero y el cemento.
- Genera un aumento en la retracción, lo que causa una mayor probabilidad de fisuración.
- Disminuye la durabilidad, ya que cuando los tamaños de partícula del silicato tricálcico disminuyen, tienden a reaccionar más.
- Reduce la reacción del silicato dicálcico, siendo este el que genera la resistencia a la exposición y a los ataques externos.

**Figura 15. Medidos de la finura del cemento *Blaine***

Fuente: Giraldo Bolívar (2003).

### 2.6.3.1. Determinación de la finura del cemento según la NTC-33

Para realizar la prueba, es necesario conocer el valor de la constante de calibración del instrumento obtenido en el US National Bureau of Standards No. 114. Por lo tanto, se toma una muestra con una masa de aproximadamente 10 g y, si se forman masas durante el envasado, se deben colocar en un matraz tapado, donde se agiten durante 30 s. Para encontrar el tiempo, que es una medida superficial específica del material, se hace una prueba de 2,8 g de una muestra de batido entre dos papeles de filtro, asegurando una capa de porosidad del 50 %, esto se debe a que en la cámara del manómetro el tiempo se determina durante el flujo de aire, a través de la capa de porosidad se reduce el nivel del líquido en el manómetro (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1997c).

Para hacer los cálculos se debe tener en cuenta lo siguiente:

- $S_p$ : superficie específica de la muestra patrón ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).
- $T_p$ : tiempo de descenso del líquido con la muestra patrón.
- $S$ : superficie específica ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ).
- $T$ : tiempo para la muestra (s).

Las fórmulas son:

- Constante de calibración del equipo:  $k = \frac{Sp}{\sqrt{Tp}}$
- Superficie específica:  $S = \frac{Sp * \sqrt{T}}{\sqrt{Tp}} = k * \sqrt{T}$

Se puede conocer el tamaño estimado de las partículas por medio de la definición de superficie específica:

- Diámetro equivalente:  $\emptyset = \frac{7}{(\rho * S)}$

### **2.6.4. Consistencia normal**

En los ensayos de laboratorio se debe contar con la facilidad de manejo y moldeo del material, el cual se consigue cuando la pasta esta recién preparada. Para poder conseguir que la pasta tenga una consistencia normal, se requiere de una cantidad de agua que debe ser entre el 20 % y 35 %. Del peso total del cemento.

Si se desea hacer otros ensayos que tengan relación directa con el fraguado y la sanidad se debe contar con el ensayo de consistencia normal.

Al conseguir la consistencia normal del cemento se debe saber que el porcentaje de agua que se va a utilizar no depende del agua que se requiere para una correcta hidratación. En el proceso del fraguado, que ocurre entre 2 y 4 horas, se realiza una reacción menor al 0,5% de todo el peso del concreto, ya en la etapa de endurecimiento que es a los 28 días se presenta un incremento en la reacción química entre el 40 % al 50 %.

#### **2.6.4.1. Determinación de la consistencia normal según la NTC 110**

Para encontrar la primera estimación de la cantidad de agua requerida para lograr una consistencia normal, se toma una muestra de cemento de 300 g que tenga 75 ml de agua y se prepara la mezcla utilizando un agitador mecánico, de acuerdo con la NTC 112.



**Figura 16. Mezcladora mecánica**



Fuente: Universidad Centroamericana José Simeon Cañas (s.f.b).

Después se moldea y compacta la pasta con las manos.

**Figura 17. Moldeado y compactación**



Fuente: Universidad Centroamericana José Simeon Cañas (s.f.b).

Para el siguiente paso, se debe llenar el molde del equipo de , en donde se determinará la penetración de una sonda de 10 mm en 30 segundos. Si la penetración es de aproximadamente 10 mm, se considera que se consiguió la consistencia normal. En caso de no obtener ese nivel de penetración, se debe repetir la prueba utilizando otra cantidad de agua (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1991).

Figura 18. Equipo de Vicat



Fuente: Eddyhrbs (2010).

Teniendo en cuenta que:

- P: penetración (mm).
- Li: lectura inicial (mm).
- Lf: lectura final (mm).

Se usa la fórmula de penetración:  $P_i = L_i - f$

Para conseguir una buena aproximación y evitar periodos de pruebas muy extensos, se usa la ecuación de Popovics, en donde:

- W: cantidad de agua usada durante el ensayo (g).
- W<sub>cn</sub>: cantidad de agua para consistencia normal (g).
- P<sub>i</sub>: penetración obtenida.

La fórmula es:

$$W_{cn} = W_i * \sqrt[6]{\frac{10}{P_i}}$$

En el caso de querer saber el porcentaje de agua, se tiene que usar la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Agua} = \frac{\text{Peso Agua}}{\text{Peso Cemento}} * 100$$

### 2.6.5. Fraguado

El fraguado se define como la pérdida gradual de la viscosidad de la pasta del cemento a medida que transcurre el tiempo. Este proceso inicia cuando el cemento y el agua entran en contacto. El tiempo que dure el fraguado depende de la intensidad de las reacciones químicas, que se van generando gradualmente, donde el sólido va ganando capacidad para resistir cargas.

Existen tres etapas de reacción en el fraguado:

1. **Paso inicial o latente:** ocurre cuando la mezcla envejece sin un cambio grande en la plasticidad debido al efecto retardante del yeso sobre el aluminato tricálcico, lo que parece ser la causa de la solidificación del material.
2. **Etapla intermedia o de fraguado:** es el momento en que comienza a perder su plasticidad original, convirtiéndose en una pasta semidura y, paralelamente, también inicia un proceso de endurecimiento. Todo esto se debe a que el aluminato tricálcico y el silicato comienzan a actuar simultáneamente. Hay mucho calor en esta etapa.
3. **Paso final o endurecimiento:** se produce después de días, meses y años, cuando aumenta el grado de resistencia mecánica por la acción del silicato dicálcico (C2S) y el silicato tricálcico (C3S).

Durante el fraguado inicial la mezcla pierde parcialmente la plasticidad y, al momento de realizar el ensayo con las agujas de *Vicat*, presenta una resistencia a la penetración en donde la aguja, con un diámetro de 1 mm, penetra en caída libre una profundidad aproximada de 25 mm. Después de 30 segundos, en el fraguado final, la aguja no penetra la pasta sin dejar una huella visible en la superficie durante 8 horas.

#### 2.6.5.1. Determinación del tiempo de fraguado según la NTC-118

En esta norma describe el procedimiento para conocer el tiempo de fraguado. Primero, se realiza la preparación de una pasta de consistencia normal, la cual se almacena dentro de una cámara húmeda por 30 minutos, cuando transcurre este tiempo, se mide la penetración en la pasta durante 30 segundos por medio de una aguja de 1 mm de diámetro, después se vuelve a llevar a la cámara por 10 minutos y se realiza otra vez la penetración de la aguja, en el caso de que la aguja consiga penetrar se debe repetir este procedimiento. (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2004a).

**Figura 19. Cámara húmeda**

Fuente: Ineltec (2016).

### **2.6.6. Falso fraguado**

Es la pérdida repentina y rápida de plasticidad de la pasta de cemento recién preparada sin generación de calor, esta ocurre dentro de los primeros minutos cuando se prepara la mezcla de agua y cemento. Puede colapsar si se retrasa la mezcla del material.

El endurecimiento de la pasta del cemento se da con el incremento de la resistencia del concreto, pero en el caso del falso fraguado se endurece parcialmente.

#### **2.6.6.1. Determinación del falso fraguado del cemento según la NTC-297**

Por medio de estos procedimientos se determina si el cemento sufre de un falso fraguado. Para esto, se prepara una pasta con una cierta cantidad de agua, allí se puede penetrar una aguja de 10 mm de diámetro con a una profundidad entre 30 a 38 mm (penetración inicial “ $P_o$ ”) después de 30 segundos.

Cuando se consiga la plasticidad dulcificada, se debe llevar la pasta a la cámara húmeda, en dónde se deja por, al menos, 5 minutos. Transcurrido este tiempo, se vuelve a medir la penetración de la aguja (penetración final “ $P_f$ ”), si el valor obtenido resulta menor que el inicial se debe realizar otra mezcla, pero si resulta mayor, se puede concluir que el cemento no presenta falso fraguado (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1997b).

Después se debe someter la pasta a un mezclado a velocidad rápida durante 60 segundos para volver a realizar el procedimiento de la penetración de la aguja ( $P_r$ ).

Teniendo estos tres valores, se debe considerar lo siguiente:

- Fraguado normal:  $P_f \geq P_o$
- Fraguado anormal:  $P_f < P_o$
- Fraguado falso:  $P_r \geq P_o$

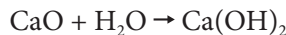
$$\%F_f = \frac{P_f}{P_o} * 100$$

### 2.6.2. Sanidad del cemento

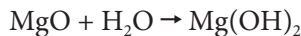
Es la característica que posee el cemento para mantener su integridad volumétrica. Se consigue en su proceso de hidratación, el cual permite garantizar que el concreto no presente cambios extremos de volumen, contracciones y expansiones que puedan producir agrietamiento y desmoronamiento con el pasar del tiempo.

La salud del cemento tiene relación con la expansión del volumen del material después de cierto número de días. Para esto, se realiza una prueba en el autoclave, estableciendo el valor de expansión potencial que conduce a la hidratación, bien sea por el óxido de cal libre (CaO), el óxido de magnesio (MgO) o el sulfato de calcio.

Para que haya cal libre en el cemento, la materia prima alimentada al horno debe tener una alta tasa de saturación de cal, donde se hidrate lentamente y, finalmente, ocupe un volumen mayor que el óxido de calcio original.



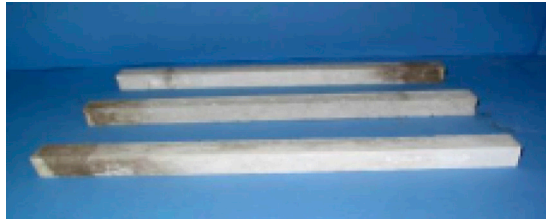
El MgO también expande el cemento, reaccionando de una forma similar al CaO.



En el caso del sulfato de calcio, su expansión se debe a un aumento en la cantidad de yeso requerida para evitar un fraguado rápido, el exceso de yeso reacciona con el silicato tricálcico provocando la expansión.

#### 2.6.2.1 Determinación de la expansión del cemento según la NTC-107

El procedimiento inicia buscando la consistencia normal con una pasta preparada de 80 g, la cual cuenta con la cantidad necesaria de agua. Con esta pasta se modela, de manera manual, barras prismáticas, las cuales van a contar con una longitud de 254 mm y serán dejadas en la cámara húmeda por al menos 24 horas.

**Figura 20. Barras primaticas de cemento**

Fuente: Universidad Centroamericana José Simeon Cañas (s.f.c).

Pasado este tiempo, se sacan las barras y se mide su longitud con un comparador que posea una precisión aproximada a diezmilésimas de pulgada.

**Figura 21. Comparador de longitud**

Fuente: Universidad Centroamericana José Simeon Cañas (s.f.c).

Después se llevan las barras al autoclave, en donde se van a someter a una temperatura de 216 °C por 3 horas, con presión del vapor de agua de 20 atm.

**Figura 22. Autoclave**

Fuente: Universidad Centroamericana José Simeon Cañas (s.f.c).

La barra va a presentar una expansión al terminar el tratamiento térmico, por eso debe ser llevada a un baño de agua que se encuentre a una temperatura de 100 °C, en donde se le va a ir agregando agua fría durante 15 minutos. Después se mide la longitud final de las barras para conocer su cambio volumétrico (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019a).

Teniendo en cuenta los siguientes elementos:

- Lf: lectura final (mm)
- Lo: lectura inicial (mm)

Se puede calcular:

- Cambio de longitud:  $\Delta L = L_f - L_o$
- Expansión:  $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o}$
- Porcentaje de expansión:  $\% Exp = \varepsilon * 100$

### **2.6.8. Fluides**

En el concreto y en la pasta recién prepara se puede determinar el grado de cohesión de las partículas cuando son sometidas a cierta cantidad de caídas libres utilizando la mesa de fluides. Así también se establece el grado de plasticidad de la mezcla.

**Figura 23. Mesa de fluidez del concreto**

Fuente: Utest (s.f.).

Los ensayos de fluidez son utilizados como parámetro inicial para considerar la cantidad de agua que se necesita al momento de evaluar la resistencia a compresión de algún cemento *Portland* adicionado. Si el porcentaje de fluidez está oscilando entre 100 % y 115 % se puede moldear y manejar de forma óptima.

En el caso de un cemento *Portland* sin adiciones, la cantidad de agua para determinar la resistencia se considera constante e igual a 0,485, teniendo en cuenta el peso del cemento.

**Tabla 8. Porcentaje de fluidez**

Tipo de mezcla	Usos	Porcentaje de fluidez	Consistencia
Mezcla seca	Prefabricados	0 – 10	Alta
Mezcla húmeda	Pisos	20 – 50	Media
Plástica	Enchapes y pegas	50 – 100	Baja
Líquida	Rellenos e inyecciones	100 – 150	Líquida

Fuente: Giraldo Bolívar (2003).



### 2.6.8.1. Fluidéz de morteros de cementos según la NTC-111

Se separa el mortero siguiendo las indicaciones de la NTC-112 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1995a) para después ser llevado a un molde donde va a conseguir un espesor de 25 mm, después de ser pisado 20 veces con el compactador. Por último, se elimina la cantidad sobrante de mortero, se enrasa y se levanta el molde de manera vertical. El material se deja sobre la mesa, donde se va a someter a 25 caídas a una altura de 13 mm en 15 segundos.

Para determinar la fluidéz se utiliza el calibrador, además, para conocer el diámetro del mortero, se debe conocer el diámetro inicial del molde y el diámetro final que se obtiene al terminar el procedimiento, con estos valores se saca el diámetro promedio (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1997a).

Teniendo en cuenta:

- A: Diámetro real del molde (mm).

Se calcula el porcentaje de fluidéz:

$$\% \text{ fluidéz} = \frac{\text{Diámetro promedio} - A}{A} * 100$$

### 2.6.9. Contenido de aire

Durante la etapa de preparación y moldeo, la mezcla suele atrapar cierta cantidad de aire, la cual forma burbujas con un diámetro de varias micras almacenadas, tanto en los vacíos de gel como en los capilares del cemento.

Las mezclas de un mortero se clasifican en dos:

- **Las mezclas con aire:** se utilizan para tener una alta durabilidad cuando existe riesgo de congelamiento o deshielo, así mismo, cuando se pretende obtener un aislamiento térmico o acústico.
- **Las mezclas sin aire:** se utilizan de manera general. En su preparación no actúan agentes inclusores de aires, sino que lo atrapan durante el proceso de fabricación sin superar el 5 % del volumen total.

Para determinar el contenido de aire se tienen los siguientes métodos:

- Método presión.
- Método volumétrico.
- Método gravimétrico.

El contenido de aire atrapado mejora las características de manejabilidad, pero también afecta la resistencia. En las situaciones extremas donde hay más cantidad

de aire, la resistencia solamente alcanza para cubrir el peso total del material, pero en donde es menor o igual al 5 %, la resistencia sólo descende un 30 %.

### 2.6.9.1. Ensayo para determinar el contenido de aire según la NTC-224

Para este ensayo se utiliza un molde cilíndrico que cuenta con masa y volumen conocido, el cual se llena con tres capas de la mezcla previamente preparada, según la NTC-112 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificados, 1995a). Esta mezcla es compactada con 20 golpes, luego se quita la cantidad sobrante de mortero, posteriormente se enraza y se mide la totalidad de la masa (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificados, 2017).

Para los cálculos hay que tener en cuenta:

- $M_r$ : Masa del cilindro.
- $V_r$ : Volumen del cilindro.
- $M_t$ : Masa del conjunto.
- $MUT$ : Masa unitaria teórica del material.
- $MUR$ : Masa unitaria real del material.

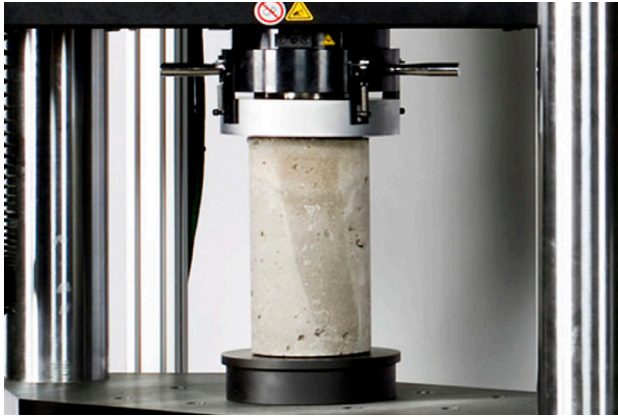
Fórmulas:

- Masa unitaria real: 
$$MUR = \frac{(M_t - M_r)}{V_r}$$
- Porcentaje de aire: 
$$\%Aire = \frac{MUT - MUR}{MUT} * 100$$

## 2.7. Propiedades mecánicas

### 2.7.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la capacidad que tiene el concreto para absorber de manera eficiente las cargas axiales.

**Figura 24. Resistencia a la compresión**

Fuente: Reyes Estrada (2013).

Esta depende de una gran cantidad de variables que, en el momento de la práctica, se reducen entre la relación del agua y el cemento, ya que, si es alta, la resistencia disminuye. También están otras variables como agregados contaminados, cambios en la producción del cemento o el tipo de agua (dulce o salada).

### **2.7.1.1. Determinación de la resistencia a la compresión según la NTC-220**

Los moldes se llenan con la mezcla establecida en la norma NTC-112 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1995a) y se deben colocar en la cámara húmeda entre 20 a 24 horas, después de este tiempo pasan a la máquina de ensayos (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2004b).

**Figura 25. Moldes**

Fuente: Díaz (2012).

Para saber la resistencia a compresión se debe realizar un cálculo teniendo en cuenta que:

- P: máxima carga total (N).
- A: área de la superficie cargada (mm<sup>2</sup>).
- $\sigma$ : resistencia a la compresión (MPa).

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

### **2.7.2. Resistencia a la tracción directa**

La resistencia directa a la tracción puede considerarse como la capacidad del concreto para mantener la carga.

Los ensayos para conocer la resistencia a la atracción directa resultan difíciles de realizar y son pocos comunes debido al montaje de la prueba, además, tienen correlación con la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

Conocer la resistencia a los esfuerzos de compresión y la resistencia a tracción es importante para saber las condiciones a deflexión y figuración del material. Por medio del ensayo de flexión se puede conocer la resistencia a la atracción de manera indirecta.

#### **2.7.2.1. Determinación de la resistencia a tracción del cemento**

Se deben anotar los valores de la carga máxima y del área de la probeta:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

### **2.7.3. Resistencia a la tracción por flexión**

Al momento de realizar el diseño estructural se debe poder predecir cómo se va a comportar la estructura al estar sometida a los diferentes tipos de cargas, también es necesario conocer con suficiente precisión la resistencia máxima, la cual debe ser mayor o igual que la requerida por las cargas.

La predicción de la resistencia última se puede dificultar, debido a que las cargas que actúan en la estructura están muy cerca a la carga máxima que pueda soportar la distribución del esfuerzo, tomando en cuenta que las deformaciones evitan que sea una distribución elástica.

**Figura 26. Ensayo de resistencia a tracción por flexión**



Fuente: Ordóñez y Eguez Alava (2009).

### **2.7.3.1. Determinación de la resistencia a tracción por flexión según la NTC-120**

Esta norma indica que se debe ir anotando la carga máxima que muestra la máquina de ensayo con la que se calcula la resistencia a flexión (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2009).

- $S_f$ : resistencia a la flexión (kPa).
- $P$ : carga máxima (N).

$$S_f = 2,8 * P$$

## CAPÍTULO 3

# AGREGADOS

En promedio, el 75 % del volumen total de una mezcla lo constituyen los agregados, los cuales suelen ser materiales de forma granular. Algunos son de origen natural (como los de origen pétreo) y otros de origen artificial ( como granulares, poliuretanos, limaduras metálicas, entre otros). Los agregados y el cementante conforman el esqueleto pétreo o granular del material.

**Figura 27. Agregados**



Los agregados que se utilizan en el cemento cuentan con alta resistencia, rigidez y durabilidad; aunque esto no garantiza que se consiga la adherencia suficiente con la pasta endurecida.

La mayoría de los agregados, generalmente, no reaccionan con otros ingredientes del concreto, pero existen casos donde una pequeña fracción desarrolla algún tipo de actividad, como en los casos de las escorias de alto horno, el ladrillo triturado y los materiales de origen volcánico consolidativo, estos pueden llegar a interferir en el desarrollo de la resistencia mecánica.

### 3.1. Importancia en el concreto

Existen varias razones por las cuales deben estar presentes los agregados en una mezcla de concreto, estas son:

- **Manejabilidad:** los agregados resultan importantes porque facilitan la colocación y compactación de las partículas más gruesas por medio de las fracciones más finas, las cuales, junto con la pasta cementante, permiten lograr la manejabilidad necesaria.
- **Resistencia estructural:** el hormigón adquiere su resistencia mecánica cuando es combinado con los agregados y está en su estado endurecido.
- **Densidad:** la densidad del concreto está relacionada directamente con la densidad de los agregados, la cual varía dependiendo del tipo de roca y del grado de porosidad interior y exterior.
- **Densidad en bruto:** resulta ser la relación entre la masa de un material y el volumen que ocupa. Se utiliza para hallar la cantidad de árido necesario para obtener una unidad de volumen de cemento.
- **Densidad real:** es la relación entre el peso y el volumen del material, sin embargo, no se deben considerar los vacíos saturados y no saturados.
- **Densidad aparente:** es la relación entre el peso y el volumen del material, en donde se deben considerar los vacíos saturados.
- **Durabilidad:** los agregados cumplen con la función de transferir a la masa de hormigón sus propiedades de resistencia para soportar condiciones extremas.
- **Acabado:** para el hormigón arquitectónico, el agregado permite lograr un acabado superficial en función de la textura deseada, como en los casos donde la forma, el color, la textura y el tamaño son de agregados.

(Camey, 2008; Cárdenas Gutiérrez *et al.*, 2022; Yam *et al.*, 2003).

**Tabla 9. Densidad de diferentes tipos de rocas**

Nombre	Densidad promedio (Kg/m <sup>3</sup> )	Rango de variación (Kg/m <sup>3</sup> )
Pedernal	2,54	2,4 – 2,6
Cuarzita	2,62	2,6 – 2,7
Caliza	2,66	2,5 – 2,8
Arenisca	2,69	2,6 – 2,9
Porfido	2,73	2,6 – 2,9
Basalto	2,8	2,6 – 3
Homblenda	2,82	2,7 – 3

Fuente: elaboración propia.

## 3.2. Clasificación

### 3.2.1. Tamaño de las partículas

- **Agregados naturales:** provienen de fuentes naturales, tales como las canteras de diversas rocas, los glaciares y los depósitos fluviales. Necesitan ser triturados mecánicamente o se debe considerar el tipo de cemento requerido para realizar una graduación natural.
- **Agregados artificiales:** se consigue utilizando procesos industriales como el clínker, las cenizas del carbón, escorias de alto horno, limaduras de hierro, aserrín y viruta.

### 3.2.2. Según su forma

Los agregados tienen diferentes formas dependiendo de su procedencia, por ejemplo, los agregados de río o depósitos aluviales cuentan con una forma redonda o aplanada. Mientras los agregados provengan de rocas naturales pueden a ser sometidos en un proceso de trituración y clasificación en donde se puede determinar su forma, la cual varía entre cúbica, poliédrica, esquirlas alargadas o laminares aplanadas.

**Tabla 10. Clasificación de los agregados**

Clasificación	Descripción
Redondas	Se forman por medio de la fricción o el desgaste por el agua.
Alargada	Su longitud es mucho mayor que las otras dos dimensiones. Al inicio suele ser angular.
Escamosa	Este material cuenta con un espesor pequeño comparado con sus otras dos dimensiones.



Clasificación	Descripción
Escamosa y alargada	En este caso el espesor es mucho menor que el ancho y su longitud es bastante mayor que el ancho.
Angular	Se suelen formar en las interacciones de caras aproximadamente planas y cuenta con bordes definidos.
Irregulares	Son naturalmente irregulares, pero pueden tener los bordes redondeados u obtener una forma por medio de la fricción.

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.3. Según su textura

La textura se encuentra en la superficie del material y se consigue por medio del pulimiento o la degradación. La textura influye notablemente en el momento en que las partículas del agregado se adhieren, al igual que en las condiciones de fluidez cuando la mezcla se encuentra en estado plástico.

Tabla 11. Textura superficial de los agregados

Grupo	Textura superficial	Características
1	Vítrea	Fractura conoidal.
2	Lisa	Se consigue por medio de un desgaste con agua o es lisa por la fractura de la roca laminada o de grano fino.
3	Granular	Es por medio de la fractura que se consiguen granos casi redondos de una forma uniforme.
4	Áspera	De granos finos que contienen una parte cristalina difícil de detectar.
5	Cristalina	Cuenta con partes cristalinas fáciles de detectar.
6	En forma de panal	Con cavidades y poros visibles.

Fuente: Giraldo Bolívar (2003).

### 3.2.4. Método de extracción

- **Agregados naturales:** se obtienen de la minería de manantiales naturales, como los ríos donde se extrae arena y grava, así como de diversos glaciares y canteras. Según el tipo de hormigón y las propiedades requeridas, los áridos naturales pueden triturarse mecánicamente o utilizarse en su clasificación natural.

**Figura 28. Agregados naturales**

Fuente: pixabay.com

- **Agregados artificiales:** se derivan de procesos industriales como escoria de alto horno, limaduras de hierro, cenizas de carbón, clínker, aserrín y virutas.

**Figura 29. Clínker**

Fuente: Bonino (2008).

### **3.2.5. Densidad**

La densidad de los agregados se puede clasificar en:

- **Agregados pesados:** están compuestos por minerales de hierro como la magnetita, pirita e ilmenita, además cuentan con una densidad entre 2,9 y 6 Mg/m<sup>3</sup>.

**Figura 30. Magnetita**

Fuente: Murch (2009).

- **Agregados livianos:** son de origen volcánico y su densidad esta entre 0,2 y 1,6 Mg/m<sup>3</sup>, como en el caso de la arcilla expansiva, la pumicita y esquistos.

**Figura 31. Pumita**

Fuente: Vera León (2008).

- **Agregados normales:** tienen una densidad entre 2,4 - 2,8 Mg/m<sup>3</sup> y provienen de las rocas superficiales como el cuarzo, la caliza y el granito. Estos son muy usados.

**Figura 32. Granito**

Fuente: Rojinegro81 (2014).

### 3.3. Propiedades químicas de los agregados

#### 3.3.1. Reacción álcali-agregado

Es una reacción destructiva por la acción retardada de la sílice amorfa de los agregados, la cual actúa con los componentes alcalinos de la pasta de cemento.

Esta reacción comienza por medio de un ataque generado por los hidróxidos alcalinos, que son derivados de los álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ) del cemento. Al ser una reacción solido-liquida termina produciendo un gel, que incrementa en los momentos que absorbe ciertas cantidades de agua, esto genera una presión interna en el cemento donde primero se expande, después se fisura y, por último, genera la ruptura de la pasta (Pasquel, 1997).

**Tabla 12. Rocas potencialmente reactivas**

Tipo reacción	Grupo reactivo
Álcali-sílice	Tienen forma de sílice reactiva, ya que provienen de diversas rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas (criptocristalina, microcristalina, vítrea o cristalina intensamente deformada).
Álcali-carbonato	Contienen dolomita y minerales arcillosos, por ejemplo, algunas rocas sedimentarias carbonatadas.
Álcali-silicato	Su estructura es foliada-reticular como en las rocas metamórficas que también contienen silicatos.

Fuente: elaboración propia.

En Colombia se ha detectado que algunos agregados calizos se encuentran en la costa Atlántica, los cuales son calcáreas. También se han encontrado agregados silíceos en el sureste del departamento de Antioquia y en el viejo Caldas.

### 3.4. Propiedades mecánicas

#### 3.4.1. Resistencia

Las partículas de agregado tienen una excelente durabilidad. Es importante saber la resistencia del agregado para evitar que se descompongan antes de que la pasta se endurezca, puede darse porque la estructura es muy débil en comparación con los granos que forman las partículas durante la operación o por un inadecuado proceso de trituración.

**Tabla 13. Resistencia a la compresión de rocas comunes en agregados**

Tipo de roca	Número de muestras	Resistencia a la compresión (promedio de las muestras)	
		Kgf/cm <sup>2</sup>	Mpa
Granito	2,78	1842	181
Felsita	12	3304	324
Cuarcita	26	2566	252
Esquistos	31	1730	170
Mármol	34	1188	117
Gneis	36	1498	147
Trapa	59	2890	283
Arenisca	79	1336	131
Caliza	241	1617	159

Fuente: elaboración propia.

#### 3.4.2. Dureza

La dureza es una propiedad que depende de la estructura, del origen del agregado y la composición mineral, como en los pisos y caminos donde el agregado debe usarse para aumentar la resistencia al desgaste.

#### 3.4.3. Tenacidad

Esta propiedad es la resistencia al daño por impacto, está asociada al manejo preciso de los agregados en el molino, ya que, si estos se debilitan ante las cargas de choque recibidas durante el transporte, entonces su tamaño de grano cambiará. Además, tendrá baja resistencia para su uso en concreto.

### 3.4.4. Adherencia

La adherencia es importante para la masa del concreto ya que, si se consigue una buena interacción entre los agregados y la pasta del cemento, otorga mayor resistencia.

## 3.5. Propiedades físicas

### 3.5.1. Impureza

Las impurezas son aquellas partículas que se encuentran en los agregados, las cuales pueden acelerar o retrasar el fraguado, también afectan el aumento de resistencia y, en el peor de los casos, puede impedir estos dos procesos (Yam *et al.*, 2003).

Los tipos de impurezas más comunes son:

- **De origen orgánico:** estas impurezas provienen de la descomposición del material vegetal, como en el caso de hojas, tallos y raíces. Estas interfieren con las reacciones químicas en el momento de la hidratación, haciendo que se retrase el fraguado o lo impida. Este tipo de impurezas se encuentran más que todo en la grava, pero son fáciles de lavar.
- **Finamente divididas:** este tipo de impureza se puede dividir en tres:
  - » **Arcilla:** su tamaño es menor a los 20 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ). Este tipo de material recubre a los agregados disminuyendo la resistencia y la durabilidad del concreto, además, impide que se formen enlaces entre la pasta y los agregados. En el caso de que sea arcilla expansiva, esta genera una tensión de tracción dentro de la masa del concreto produciendo fallas debido a la humedad.
  - » **Limos:** su tamaño varía entre 20 a 50  $\mu\text{m}$ . Es obtenido por los procesos naturales de intemperismo.
  - » **Material fino de trituración:** son las partículas finas que se encuentran después de la conversión de roca natural a grava o arena. Si el agregado contiene grandes cantidades de limo y partículas finas, aumenta el requerimiento de agua, así como la cantidad de cemento requerida para mantener la relación agua-cemento óptima.

Tabla 14. Rango de tamaño de las impurezas

Nombre	Arcilla	Limo	Fino de trituración
Tamaño	< 20 $\mu\text{m}$	Entre 20 a 75 $\mu\text{m}$	> 75 $\mu\text{m}$
Efecto	Afecta la adherencia.	Aumenta la cantidad requerida de agua.	

Fuente: Giraldo Bolívar (2003).

- **Grumos o terrones:** si se encuentra una gran cantidad en la mezcla, las partículas van a absorber más agua, lo cual va a afectar la resistencia del concreto ya que estas partículas no pueden mantener su integridad al momento de ser sometidas a una ligera presión. En este tipo se encuentran los terrones de arcilla, madera y carbón.

**Figura 33. Terrones de arcilla**



Fuente: pxhere.com

- **Partículas reactivas:** este grupo representa a las inclusiones más expansivas del agregado, las cuales son las piritas de hierro y las marcasitas. Estos sulfuros tienden a reaccionar con el agua y el oxígeno, formando hidróxido. Este proceso hace que el concreto se decolore y se destruya la capa adhesiva.

**Figura 34. Pirita de hierro**



Fuente: pixabay.com

- **Partículas livianas:** el carbono es uno de estos materiales, el cual, si se encuentra en cantidades grandes y finas, altera el proceso de curado del pegamento. Otro de estos materiales la mica que, si se encuentra como un agregado fino, absorberá más agua y reducirá la resistencia.

**Figura 35. Mica**

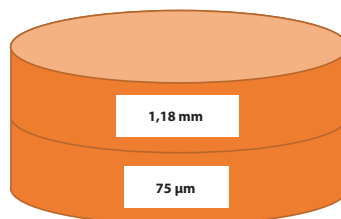


Fuente: Pascal Terjan (2012).

### 3.5.1.1. Ensayo de porcentaje de lodos según la NTC-78

Esta norma determina el proceso para saber la cantidad de lodos en el material. Primero, se pasa por los dos tamices, el superior debe medir 1,18 mm (n.º 16) y el inferior 75  $\mu\text{m}$  (n.º 200). Luego, se usa el método de lavado (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019f).

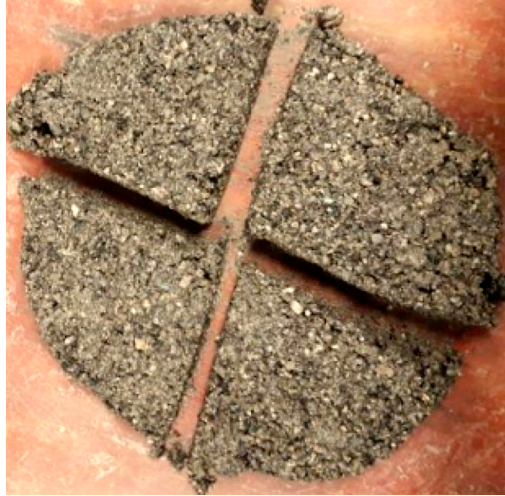
**Figura 36. Tamices usados en el ensayo**



Fuente: elaboración propia.

La muestra se debe reducir mediante el cuarteo para conseguir la cantidad idónea, la cual va a ser humedecida y mezclada para lograr la segregación mínima y evitar pérdida de finos.



**Figura 37. Cuarteo del material**

Fuente: Gómez Montilla *et al.* (2021).

En la tabla se muestra la relación entre el tamaño máximo y la masa mínima que debe tener la muestra.

**Tabla 15. Cantidad mínima de agregado**

Tamaño máximo (mm)	Masa mínima (g)
2,38	100
4,76	500
9,51	2000
19	2500
38,1	5000

Fuente: Giraldo Bolívar (2003).

Al realizar todo el proceso se obtienen los porcentajes de lodo que pueden estar presentes a la hora de fabricar el concreto, los cuales no deben exceder los siguientes valores:

**Tabla 16. Cantidad máxima de partículas menores al tamiz n.º 200**

Tipo de concreto	Porcentaje máximo de agregados finos según la masa total de la muestra	
	Natural	Manufacturado
Concreto de alta resistencia	3%	5%
Concreto normal	5%	7%

Fuente: Giraldo Bolívar (2003).

Donde se tuvieron en cuenta:

- $M_i$ : masa inicial de la muestra seca (g).
- $M_s$ : masa de la muestra seca después del lavado (g).

Para usar la siguiente fórmula de porcentaje de absorción;

$$\% \text{ absorcion} = \frac{(M_i - M_s)}{M_s} * 100$$

### 3.5.1.2. Ensayo de impurezas orgánicas según la NTC-127

Este ensayo, también conocido como ensayo de neutralización, se realiza a simple vista. El objetivo de este procedimiento es encontrar materiales orgánicos presentes en la arena utilizada en la preparación del hormigón para neutralizarlos con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) de baja concentración.

Durante el proceso, es necesario utilizar un recipiente de vidrio o plástico de 350 ml. Primero se vierte hasta 120 ml de relleno y luego se agregan 200 ml de una solución de hidróxido de sodio al 3%.

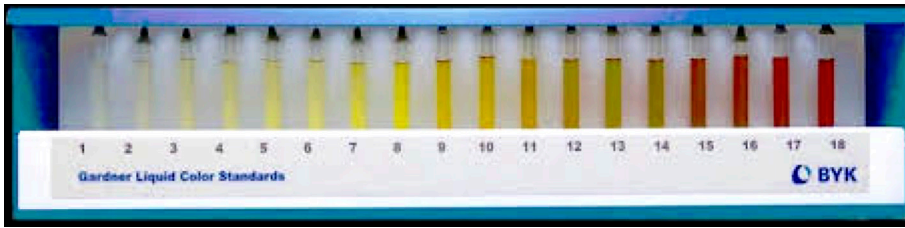
Posteriormente, se tapa el frasco y se agita para que el agregado y la solución entren en contacto, luego se deja en reposo por lo menos un día (Giraldo Bolívar, 2003). Pasado este tiempo se hace la observación de la tonalidad de la solución con la cual se va a concluir el grado de contaminación, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

**Tabla 17. Valores de contenido de materia orgánica en el agregado fino**

Número de color según el estándar Gardner	Número de placa orgánica	Descripción
5	1	Material que se puede usar para conseguir una alta resistencia.
8	2	Material que se puede usar para conseguir una resistencia normal.
11	3 (estándar)	Material no recomendado para uso de concreto estructural.
14	4	Material no apto que se debe evaluar según la NTC-579.
16	5	

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. Escala de color según el estándar Gardner



Fuente: Abaltechno (2022).

### 3.5.2. Distribución granulométrica

El análisis granulométrico es la clasificación de diferentes muestras del material según su tamaño. Se realiza por medio de una serie de tamices estandarizados, los cuales se ordenan en progresión geométrica usando la serie de Abrams, que inicia con un diámetro de 0,0744 mm hasta los 76 mm.

$$d_n = d_o \times r^n = 0,0744 \times 2^n$$

La expresión indica la repetición del número que está elevado según la progresión geométrica, que tiene una razón “r”, mientras tanto “n” expresa la posición del tamaño de la abertura y la finura del agregado.

El tamaño para un agregado se clasifica en dos:

- **Agregado fino:** es la arena que tiene una medida menor a 3 / 16”.
- **Agregado grueso:** cuenta con valor superior a 4,76 mm.

Sin embargo, esta clasificación no se considera suficiente para saber qué tipo de agregado usar en el concreto, por lo cual se usa la serie ASTM que permite conseguir una buena estimación de la composición de los materiales por su tamaño.

Tabla 18. Designación de los tamices por el tamaño de las partículas ASTM

Posición y módulo de finura	Abertura (pulg)	Abertura (mm)	Designación tamiz
0	3 / 1024	0,0744	# 200
1	3 / 512	0,149	# 100
2	3 / 256	0,298	# 50
3	3 / 128	0,595	# 30
4	3 / 64	1,196	# 16
5	3 / 32	2,381	# 8
6	3 / 16	4,762	# 4

Posición y módulo de finura	Abertura (pulg)	Abertura (mm)	Designación tamiz
7	3 / 8	9,52	3 / 8"
8	3 / 4	19,05	3 / 4"
9	3 / 2	38,1	1,5"
10	3	76,2	3"

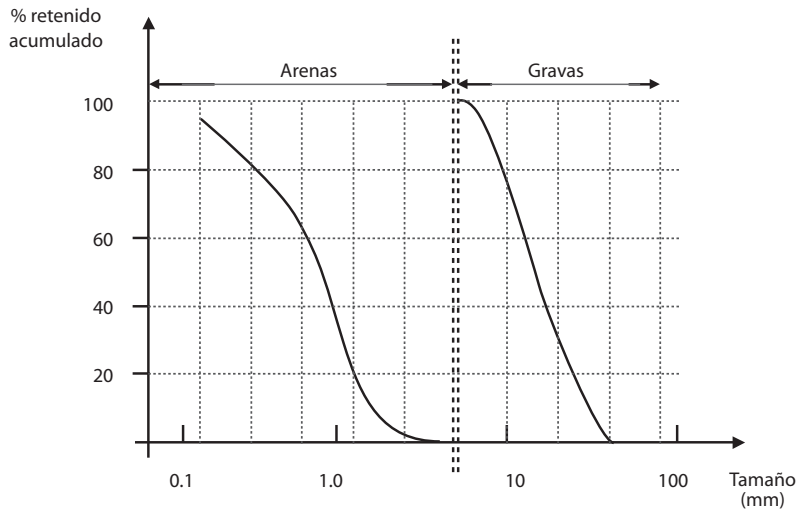
Fuente: elaboración propia.

Aparte de esta designación, los siguientes índices permiten conocer más datos sobre los agregados gruesos:

- Entre el tamaño 6 y 7 va el tamiz de 1 / 4" o de 6,35 mm.
- Entre el tamaño 7 y 8 va el tamiz de 1 / 2" o de 12,7 mm.
- Entre el tamaño 8 y 9 va el tamiz de 1" o de 25,4 mm.
- Entre el tamaño 9 y 10 va el tamiz de 2" o de 50,8 mm.

Por medio de gráficas se entiende mejor el estudio granulométrico, ya que ahí se evidencia la relación entre la retención de agregados y el tamaño del tamiz.

**Figura 39. Estudio granulométrico**



Fuente: Giraldo Bolívar (2003).

Incluso, por medio de este estudio se pueden considerar varios parámetros importantes:

- **Tamaño máximo absoluto y nominal:** son aquellos tamices que dejan pasar entre el 95 % y el 100 % del material.
- **Tamaño mínimo absoluto y nominal:** son los tamices que llegan a retener entre el 95 % y el 100 % del material.

**Tabla 19. Agregado fino que pasa según ASTM C-33**

Tamiz	Porcentaje que pasa
3 / 8"	100
n.º 4	95 a 100
n.º 8	80 a 100
n.º 16	50 a 85
n.º 30	25 a 60
n.º 50	5 a 30
n.º 100	0 a 10

Fuente: Garate Labajos (2018).

- **Módulo de finura de un agregado:** es la forma para encontrar el tamaño ideal de las partículas del material, en el caso del agregado fino esta entre 1 y 6 y para los agregados gruesos esta entre 6 y 10. Se encuentra identificando el área bajo la curva granulométrica, el porcentaje que es retenido por los tamices se suma y es dividido por 100.

$$MF = \frac{\sum_{100}^n \% \text{ retenido acumulado}}{100}$$

El principal factor para definir la granulometría de un agregado es la superficie específica, ya que, si el material cuenta con una superficie menor, va a requerir mayor cantidad de agua para poder trabajar de manera adecuada el cemento, el cual va a necesitar mayor exudación y su resistencia va a ser menor.

Al momento de hacer un concreto que requiera una resistencia mayor es ideal usar el mayor agregado grueso y agregados finos que se encuentren entre 2,5 y 3,5. La falta de partículas finas afectará el tiempo de trabajo con la mezcla, por lo que es importante tener en cuenta la distribución del tamaño de las partículas para obtener mayor beneficio.

A principios del siglo XX se dieron a conocer propuestas ideales para la granulometría, por ejemplo:

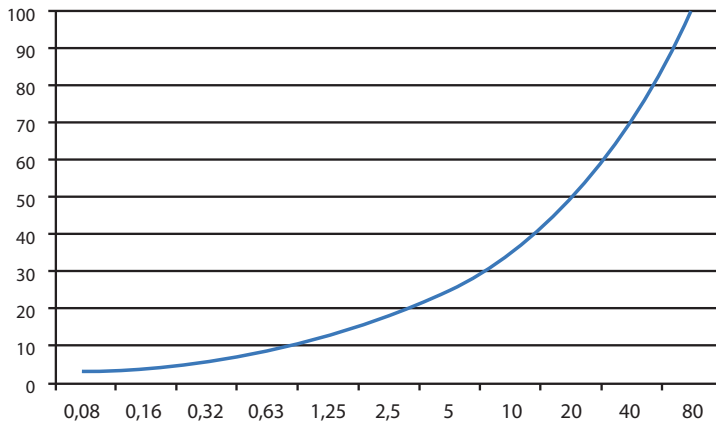
- **La curva de Fuller-Thompson:** es fácil de aplicar si se conoce la cantidad de cemento. En esta propuesta el agregado ideal debe cumplir con la siguiente fórmula:

$$y = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

- d: tamaño de la abertura de los tamices (mm).
- D: tamaño máximo del agregado (mm).

**Figura 40. Curva de Fuller**



Fuente: Agustín Ortega (2013).

- **Método de Bolomey:** su proceso se puede considerar una mejora a la curva de Fuller-Thompson. Propone la siguiente ecuación:

$$y = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

- d: tamaño de la abertura de los tamices (mm).
- D: tamaño máximo del agregado (mm).
- a: parámetro que varía según el tipo de agregado y la consistencia del concreto.

**Tabla 20. Parámetros para valor de "a"**

Tipo de agregado	Consistencia del concreto	Valor de "a"
Rodado	Seco-plástica	10
	Blanda	11
	Fluida	12
Machacado	Seco-plástica	12
	Blanda	13
	Fluida	14

Fuente: Agustín Ortega (2013).

**3.5.2.1. Determinación de la granulometría de un agregado según la NTC-77**

En esta norma indica que se debe realizar una tabla de cálculos donde se coloca el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje retenido individual del material. El tamaño de la muestra se debe tomar según la NTC-129 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019b), el cual se coloca en una serie de tamices que van de mayor a menor y, luego, se someten a un vibrador manual o mecánico, dependiendo del tipo de agregado (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, 2007).

**Tabla 21. Cálculos granulométricos para agregados finos**

n.º de tamiz	Masa retenida	Porcentaje retenido individual	Porcentaje retenido acumulado
4	$M_4$	$R_4 = \left( \frac{M_4}{M_t} \right) * 100$	$R_4$
8	$M_8$	$R_8 = \left( \frac{M_8}{M_t} \right) * 100$	$\Sigma R_i (4 - 8)$
16	$M_{16}$	$R_{16} = \left( \frac{M_{16}}{M_t} \right) * 100$	$\Sigma R_i (4 - 16)$
30	$M_{30}$	$R_{30} = \left( \frac{M_{30}}{M_t} \right) * 100$	$\Sigma R_i (4 - 30)$
50	$M_{50}$	$R_{50} = \left( \frac{M_{50}}{M_t} \right) * 100$	$\Sigma R_i (4 - 50)$
100	$M_{100}$	$R_{100} = \left( \frac{M_{100}}{M_t} \right) * 100$	$\Sigma R_i (4 - 100)$
Fondo	$M_F$	$R_f = \left( \frac{M_f}{M_t} \right) * 100$	
	$\Sigma M_i = M_t$	$\Sigma R_i = 100$	

Fuente: Giraldo Bolívar (2003).

Tabla 22. Cálculos granulométricos para agregados gruesos

n.º de tamiz	Masa retenida	Porcentaje retenido individual	Porcentaje retenido acumulado
1,5"	$M_{1,5"}$	$R_{1,5"} = \left( \frac{M_{1,5"}}{M_t} \right) * 100$	$R_{1,5"}$
1"	$M_{1"}$	$R_{1"} = \left( \frac{M_{1"}}{M_t} \right) * 100$	$\Sigma R_i (1,5" - 1")$
3 / 4"	$M_{3/4"}$	$R_{3/4"} = \left( \frac{M_{3/4"}}{M_t} \right) * 100$	$\Sigma R_i (1,5" - 3/4")$
1 / 2"	$M_{1/2"}$	$R_{1/2"} = \left( \frac{M_{1/2"}}{M_t} \right) * 100$	$\Sigma R_i (1,5" - 1/2")$
3 / 8"	$M_{3/8"}$	$R_{3/8"} = \left( \frac{M_{3/8"}}{M_t} \right) * 100$	$\Sigma R_i (1,5" - 3/8")$
No. 4	$M_4$	$R_4 = \left( \frac{M_4}{M_t} \right) * 100$	$\Sigma R_i (1,5" - 4)$
Fondo	$M_f$	$R_f = \left( \frac{M_f}{M_t} \right) * 100$	
	$\Sigma M_i = M_t$	$\Sigma R_i = 100$	

Fuente: Giraldo Bolívar (2003).

Hay que tener en cuenta que el error de ensayo no puede ser superior al 0,5 %, si se supera esta cifra se debe realizar el procedimiento otra vez. Después de obtener los resultados se calcula el módulo de finura de la arena, la superficie específica del material, el tamaño máximo y el mínimo nominal de la grava teniendo en cuenta la forma de las partículas.

### 3.5.3. Densidad y absorción

La relación masa-volumen es un factor importante en la dosificación del concreto, pero en el caso de los agregados, los cuales no se consideran sólidos debido a su constitución interna y externa, que cuentan con vacío, como los poros no saturables y saturables, se deben considerar los siguientes cálculos:

$$\text{Densidad real} = \frac{M_S}{V_S}$$

$$\text{Densidad aparente} = \frac{M_S}{(V_S + V_i)}$$

$$\text{Densidad en bruto} = \frac{M_S}{(V_S + V_i + V_p)}$$



Teniendo en cuenta que:

- MS: masa del sólido.
- VS: volumen del sólido.
- Vi: poros no saturables.
- Vp: poros saturables.

La densidad bruta es más fácil de realizar durante la práctica de laboratorio, ya que se pueden utilizar métodos de desplazamiento convencionales, además, este valor no difiere mucho de la densidad real del material porque el volumen poroso del agregado no supera el 3,5 %.

Al momento de realizar los cálculos de las mezclas resulta de gran importancia utilizar la densidad relativa o el peso específico, a partir de estos se saca el valor de la densidad de los agregados.

- **Peso específico en bruto seco:** viene determinado por la relación entre la densidad del agua y la densidad del material, teniendo en cuenta la tabla de materia seca.
- **Porcentaje de absorción:** es la capacidad del agregado para retener agua en sus poros saturados y permanecer no saturado después de sumergirlo durante al menos 24 horas.
- **Peso específico en bruto saturado:** es la relación entre la densidad del agua y la densidad aparente del material, teniendo en cuenta el peso seco saturado de la superficie.

La porosidad de un agregado se mide considerando su capacidad para absorber el agua. el cual puede ser saturado internamente y seco superficialmente, seco totalmente, saturado interna y externamente o húmedo.

### 3.5.3.1. Ensayos en arenas según la NTC-237

En esta norma determinan tomar una muestra de 2000 g que se divide mediante el método del cuarteo, luego se sumerge durante aproximadamente 24 horas para que se llenen los poros del material. Después de ese tiempo se deja al aire para que tenga un secado lento y se elimine el exceso de agua de la superficie. En estas condiciones se pueden evaluar las condiciones de la saturación superficialmente seca (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1995b).

El procedimiento consiste en llenar el molde troncocónico de la muestra, luego se compacta por medio de 25 golpes. La mezcla será distribuida por medio de 3 capas para poder ver la reacción:

- Si conserva la forma indica que el material todavía está húmedo.

**Figura 41. Muestra húmeda**



Fuente: Universidad Centroamericana José Simeon Cañas (s.f.a).

- Si se derrumba totalmente quiere decir que la muestra está totalmente seca.

**Figura 42. Muestra seca**



Fuente: Universidad Centroamericana José Simeon Cañas (s.f.a).

- Si se derrumba la parte de arriba cuenta con la condición de saturación requerida.

**Figura 43. Muestra con la saturación requerida**



Fuente: Universidad Centroamericana José Simeon Cañas (s.f.a).

Cuando se cumpla con la condición, el material se debe poner en un frasco volumétrico que tenga 200 ml de agua, es importante medir el volumen de agua desalojado. Estos dos materiales deben llenar el molde hasta los 450 ml. Después, se debe extraer el recipiente y el material se somete al horno con una temperatura de 105 °C, donde se va a secar y va a conseguir su masa constante.

Hay que tener en cuenta estos valores:

- $M_S$ : masa seca en el aire (g).
- $M_{SSS}$ : masa saturada superficialmente seca (g).
- $V_f$ : volumen de agua después de vaciar la muestra (ml).

Luego, se deben realizar los cálculos con las siguientes fórmulas:

- Densidad en bruto seca: 
$$\delta_s = \frac{M_S}{(V_f - 200)}$$
- Densidad en bruto saturada superficialmente seca: 
$$\delta_{SSS} = \frac{M_{SSS}}{(V_f - 200)}$$
- Porcentaje de absorción: 
$$\% Abs = \frac{(M_{SSS} - M_S)}{M_S} * 100$$

### 3.5.3.2. Ensayos en gravas según la NTC-176

Para esta prueba se deben tomar aproximadamente 5000 g de agregado, los cuales se dividirán por fraccionamiento. Posteriormente, hay que remojar la muestra en agua por 24 horas para que se llenen los vacíos del material. Luego, se pasa la muestra al tamiz n.º cuatro, donde se retira el material pasado y se toma la muestra de prueba para secar la superficie, aquí se obtienen los valores de peso seco de la superficie saturada y del peso del material. Finalmente, el material se deja en el horno a 105 °C para obtener el peso constante. (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019c).

Con estos valores se hacen los siguientes cálculos:

- Densidad en bruto seca: 
$$\delta_s = \frac{M_s}{(M_{SSS} - M_{SUM})}$$
- Densidad en bruto saturada: 
$$\delta_{SSS} = \frac{M_{SSS}}{(M_{SSS} - M_{SUM})}$$
- Porcentaje de absorción: 
$$\%Abs = \frac{(M_{SSS} - M_s)}{M_s} * 100$$

Teniendo en cuenta que:

- MS: masa seca en el aire (g).
- MSSS: masa saturada superficialmente seca (g).
- MSUM: masa sumergida (g).

### 3.5.4. Masas unitarias y porcentaje de vacíos

El porcentaje de vacíos es la relación que existe entre el peso de un sólido y el volumen de la materia en un recipiente con el peso y el volumen conocido. Esta definición sirve como base para obtener la relación de vacíos que tiene el agregado, la cual es la medida que representa el grado de empaque, este nos permite saber cuál es la cantidad de pasta requerida para llenar los espacios que existen entre las partículas del material.

Si el peso unitario llega a disminuir quiere decir que existe más espacio en los vacíos, los cuales se deben llenar con la pasta, lo que va a incrementar los costos y va a afectar el comportamiento del hormigón con el pasar del tiempo.

También hay que tener en cuenta la granulometría del agregado, el nivel de compactación que debe ser utilizado para que el material se acople al molde y la forma de sus partículas.

### 3.5.4.1. Procedimiento

Para conocer el valor de la masa unitaria primero se debe seleccionar el volumen del medidor teniendo en cuenta el tamaño máximo del agregado.

**Tabla 23. Recipientes para medida de la masa unitaria en agregados**

Tamaño máximo del agregado	Volumen del medidor (L)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Calibre lámina pared (mm)	Calibre lámina fondo (mm)
1 / 2"	3	155	160	3	5
1"	10	205	305	3	5
1,5"	15	255	295	3	5
4"	30	355	305	3	5

Fuente: Giraldo Bolívar (2003).

El agregado debe secarse al aire para iniciar la medida con alguno de los siguientes ensayos:

- **Masa unitaria suelta:** se inicia con el relleno de material en un molde, dejándolo caer desde 50 mm, tomando como guía el borde superior del molde para llenarlo por completo, luego se nivela el material. Así es posible llenar el volumen con un agregado de menor diámetro para, finalmente, medir su masa total.
- **Masa unitaria compacta:** se realiza únicamente para áridos gruesos. Consiste en llenar el recipiente con tres capas iguales en volumen, cada una se compactará 25 veces con una barra lisa de 16 mm de diámetro y una barra semicircular, luego el peso es determinado.

Después de tener este valor se halla la masa unitaria por medio de la siguiente ecuación:

$$M. U = \frac{(M_t - M_r)}{V_r}$$

Teniendo en cuenta que:

- Mr: masa del recipiente.
- Mt: masa total.
- Vr: volumen del recipiente.

Para hallar el porcentaje de vacío en el interior del volumen se determina la densidad y la masa unitaria con esta ecuación:

$$\%V = \left(1 - \frac{M.U}{\delta_s}\right) * 100$$

### **3.5.5. Humedad superficial**

Cuando se está haciendo el análisis para una obra se debe tener en cuenta el clima del lugar, si el concreto se ve expuesto a la lluvia y al secado continuamente va a adquirir aproximadamente el 30 % de agua almacenada. Además, se debe considerar que el agregado, por lo general, no supera el 3 % de agua de saturación, por lo tanto, se deben realizar ajustes en el momento de la fabricación.

A la hora de diseñar una mezcla de concreto se debe tener en cuenta la hipótesis básica que considera que las propiedades mecánicas y la durabilidad del material resultan ser función de la relación que existe entre la cantidad de agua que requiere la mezcla y el contenido de cementante (A/C). Esta relación ha sido probada en múltiples ensayos de laboratorio, los cuales nos permiten predecir la resistencia que adquiere el concreto dependiendo del A/C por medio de la siguiente fórmula:

$$f'c = \frac{90}{11^{A/C}}$$

También se debe tener en cuenta la humedad de los agregados y el exceso de agua. Estos valores varían dependiendo del tipo de agregado, lo cual disminuye manera considerable la cantidad de agua que se le debe adicionar a la mezcla.

Existen muchos procedimientos para poder determinar la cantidad de agua que requiere un agregado, los cuales se pueden dividir en dos grupos: los que son de laboratorio y los que son de campo, también se pueden clasificar entre los métodos rápidos y los lentos.

Los métodos rápidos permiten hacer correcciones al mezclar, los cuales son:

- Equipo nuclear.
- Medidor eléctrico *Speedy*.
- Secado intensivo en el cual se quema el material con alcohol.
- Desplazamiento en líquidos.

#### **3.5.5.1 Método de secado a temperatura constante según la NTC-1776**

En esta norma indican el proceso de secado a temperatura constante, el cual se describe a continuación: del agregado se sustrae una muestra de acuerdo con el tamaño máximo, luego, se mide la masa requerida y se lleva al horno a 105 °C hasta

conseguir una masa constante. La diferencia entre la masa respectiva y la masa seca en porcentaje permite conseguir la humedad total (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019d).

- Contenido total de humedad: 
$$h_t = \frac{(M_i - M_s)}{M_s} * 100$$
- Humedad superficial: 
$$h_s = h_t - h_a$$

Donde:

- ht: contenido de humedad en la muestra (%).
- Mi: masa inicial de la muestra (g).
- Ms: masa de la muestra seca (g).
- hs: humedad superficial (%).
- ha: humedad de absorción (%).

### 3.5.6. Humedad superficial por frasco volumétrico

Se introducen 500 g de arena húmeda en un frasco volumétrico con 200 ml de agua. Posteriormente, se observa cuánta agua se mueve y se agregan 450 ml para medir la masa en conjunto. En este caso, la humedad superficial se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

- Humedad superficial: 
$$h_s = \left( \frac{500[\delta_{sss} - 1]}{\delta_{sss}[M_t - M_f]} - 1 \right) * 100$$
- Humedad total: 
$$h_t = h_s + h_a$$

Donde:

- hs: humedad superficial (%).
- $\delta_{sss}$ : densidad saturada (g).
- Mt: masa del conjunto (g).
- Mf: masa del frasco lleno (g).
- ht: contenido de humedad en la muestra (%).
- hs: humedad superficial (%).
- ha: humedad de absorción (%).

### 3.5.7. Humedad superficial secada con alta intensidad

En este proceso, se colocan 500 g de arena húmeda en un molde metálico, luego se transfieren a la fuente de calor, donde el secado garantiza el calor obtenido. Se debe

mezclar de manera uniforme para saber que el material está seco y, posteriormente, se coloca una placa de vidrio que no debe empañarse.

Luego debe retirarse de la fuente de calor y dejarse en reposo hasta que pueda alcanzar la temperatura ambiente. Para determinar la humedad total, se hace la siguiente ecuación:

- Contenido total de humedad: 
$$h_t = \frac{(M_i - M_s)}{M_s} * 100$$
- Humedad superficial: 
$$h_s = h_t - h_a$$

Donde:

- $h_t$ : contenido de humedad en la muestra (%).
- $M_i$ : masa inicial de la muestra (g).
- $M_s$ : masa de la muestra seca (g).
- $h_s$ : humedad superficial (%).
- $h_a$ : humedad de absorción (%).

Este proceso cuenta con el siguiente inconveniente: al someter la muestra a un secado intenso se puede llegar a perder parte de su peso, el cual no corresponde a la cantidad de agua, por ello los resultados deben corregirse usando ecuaciones estadísticas dependiendo de cada agregado que se decida utilizar.

### **3.5.8. Humedad superficial por quemado con alcohol**

Para este ensayo se toma una muestra de 500 g de arena húmeda y se coloca en un recipiente metálico, luego se va a rociar entre 50 y 150 ml de alcohol, la cantidad varía dependiendo de la cantidad de humedad que contenga el agregado.

Después de la primera adición de alcohol, se hace una evaluación visual para considerar si el agregado ya está seco, teniendo en cuenta su color o estado de flujo libre de partículas desfavorables. Se pueden requerir hasta tres adiciones de alcohol.

Ecuaciones:

- Contenido total de humedad: 
$$h_t = \frac{(M_i - M_s)}{M_s} * 100$$
- Humedad superficial: 
$$h_s = h_t - h_a$$



Donde:

- ht: contenido de humedad en la muestra (%).
- Mi: masa inicial de la muestra (g).
- Ms: masa de la muestra seca (g).
- hs: humedad superficial (%).
- ha: humedad de absorción (%).

Esta prueba también tiene la desventaja de que el material se expone al calor directo y puede perder peso de manera inconsistente con su contenido de agua.

### **3.5.9. Humedad superficial en probetas**

Para este ensayo se necesitan dos probetas de 1000 ml, una va a ser llenada con agua hasta los 300 ml y se le introducirá el agregado seco hasta que llegue a los 600 ml, la otra probeta se va a llenar hasta el mismo nivel con agregado húmedo.

Con estos valores se podrán trabajar las siguientes ecuaciones:

- Humedad superficial: 
$$h_s = \left( \frac{[V_h - V_s]}{\delta_{sss}[V_s - V_w]} \right) * 100$$
- Humedad total: 
$$h_t = h_s + h_a$$

Donde:

- hs: humedad superficial (%).
- $\delta_{sss}$ : densidad saturada (g).
- Vh: volumen del agregado húmedo (ml).
- Vs: volumen del agregado en la primera probeta (ml).
- Vw: volumen del agua en la primera probeta (ml)
- ht: contenido de humedad en la muestra (%).
- hs: humedad superficial (%).
- ha: humedad de absorción (%).

## CAPÍTULO 4

# MEZCLAS

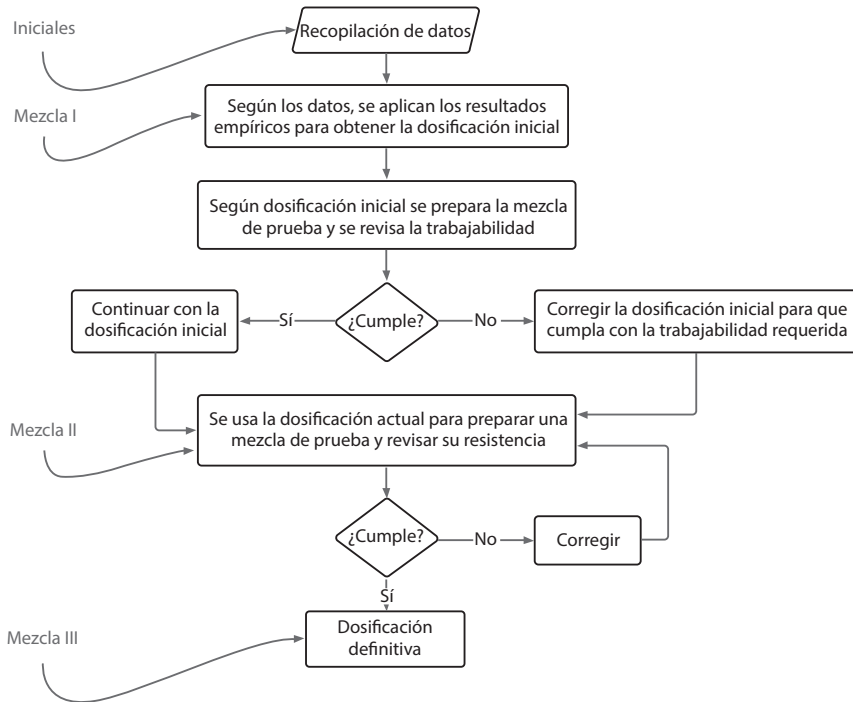
### **4.1. Diseño de mezclas de concreto**

El costo, la resistencia, el rendimiento, la durabilidad y la apariencia son variables que determinan el comportamiento del concreto, al diseñar una mezcla nos enfrentamos a ellas en todas las etapas.

Dependiendo de la demanda de hormigón, se preselecciona el material para optimizar algunas variables que cobran más importancia sobre las demás. Debido a estos requerimientos, se han desarrollado varios métodos para optimizar una o más variables específicas con el fin de obtener concreto con criterios como: normal, seco, pesado, liviano, alta resistencia, autonivelante, fraguado rápido, bien mezclado, mezclado de aditivos y alto rendimiento.

#### **4.1.1. Método ACI 211.1**

El Instituto Americano del Concreto (ACI) creó un método con resultados aceptables después de unas extensas investigaciones fundamentadas en los trabajos experimentales de Abrams, Richard y Talbot, Goldbeck y Gray (Mosquera Gómez, 2019), en donde se utilizan dos agregados que cuentan con una masa unitaria entre 2 y 2,5 Mg/m<sup>3</sup> y tienen un requisito de resistencia menor a 42 Mpa, el cual es llamado concreto normal.

**Figura 44. Algoritmo para el diseño de mezclas según el método ACI 211.1**

Fuente: Giraldo Bolívar (2006).

#### 4.1.1.1. Datos iniciales

Antes de iniciar con este método se debe tener en cuenta ciertos datos que van relacionados con la estructura, los materiales y los registros estadísticos. Es necesario recopilar esta información para compararla con mezclas similares y clasificar las variables con prioridad en el proyecto, también se deben cumplir con las siguientes normas:

1. Agregados: NTC-174 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificados, 2018).
2. Cemento: NTC-121 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificados, 2021a).
3. Agua: NTC-3459 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificados, 2001).
4. Aditivos: NTC-1299 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificados, 2008).
5. Adiciones: NTC-3493 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificados, 2019e).

A continuación, se va a explicar cuáles son los datos necesarios:

#### 4.1.1.1. Condiciones de colocación

Primero, se debe definir la trabajabilidad en la mezcla teniendo en cuenta lo siguiente:

1. La formaleta en que se va a usar.
2. El método de vibrador.
3. Transporte de los materiales.
4. La textura final.
5. Necesidades de bombeo.

Aparte de estas características también hay otras, ya que medir la trabajabilidad de una mezcla no es tan sencillo, por lo que se deben realizar ciertas pruebas y una de ellas en la prueba de asentamiento que va según la norma NTC-396 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificados, 2021c).

**Tabla 24. Valores de trabajabilidad en las diferentes estructuras**

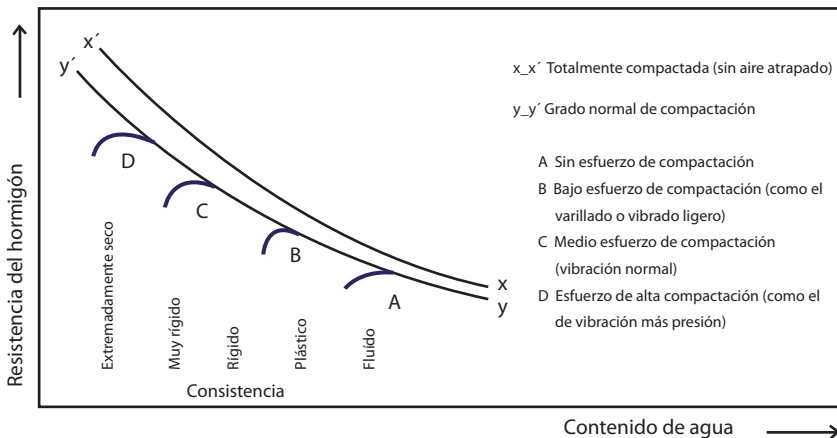
Compactación	Consistencia	Asentamiento (mm)	Fluidez (%)	Tipo de estructura
Vibro compactación	Muy rígida	0 – 10	10 – 30	Se usa en pavimentos de transporte pesado y con fuerte vibración. Elementos prefabricados.
Alta vibración	Rígido	20 – 40	30 – 50	Se usa en pavimentos con maquina terminadora vibratoria, además de cimentaciones de concreto masivo, en secciones poco reforzadas y vibradas, y muros no reforzados.
Vibración normal	Plástica	50 – 90	50 – 70	Se usa en los muros de contención reforzados, pavimentos compactados normalmente, cimentaciones, losas, vigas y columnas poco reforzadas.

<b>Baja vibración</b>	Fluida	100 – 150	70 – 100	Se usa en secciones muy reforzadas como vigas, losas y columnas, además de muros reforzados, concreto a colocar en condiciones difíciles.
<b>Sin vibración</b>	Líquida	> 150	> 100	Se usa en el concreto transportado por bombeo, concreto autonivelante (no se recomienda vibrarlo).

Fuente: Giraldo Bolivar (2006).

En la mayoría de estas tablas se cuenta con un rango de asentamiento muy amplio en el grado de trabajo, por eso resulta impreciso hacer la elección de un valor.

**Figura 45. Efecto de la compactación en la resistencia del concreto**



Fuente: Giraldo Bolivar (2006).

**4.1.1.2. Requisitos de resistencia**

Se debe especificar la cantidad requerida de la resistencia del concreto a la compresión ( $f'c$ ) para la construcción de la estructura. Por lo general, estos valores se encuentran especificados en los planos y en las memorias estructurales, de igual manera, estos datos se llegan a obtener mediante el ensayo sobre probetas estándar en un tiempo definido.

**4.1.1.2. Experiencia en el diseño de mezclas**

Las características del concreto no dependen solamente de las cantidades de cada material, también influye el cuidado durante la preparación y el curado de la mezcla.

El cuidado está determinado por la experiencia que tiene quien fabrica la mezcla, dependiendo de esto se tendría que aumentar el  $f'c$ .

La NSR-98 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, s.f.) indica que para ser un concreto aceptable debe cumplir con los siguientes requisitos:

- En los ensayos individuales, la mayoría de los resultados de los ensayos a la compresión deben ser superiores a  $f'c - 35$  Mpa.
- En la gran mayoría de los promedios de tres ensayos consecutivos su resultado debe ser superior al  $f'c$ .

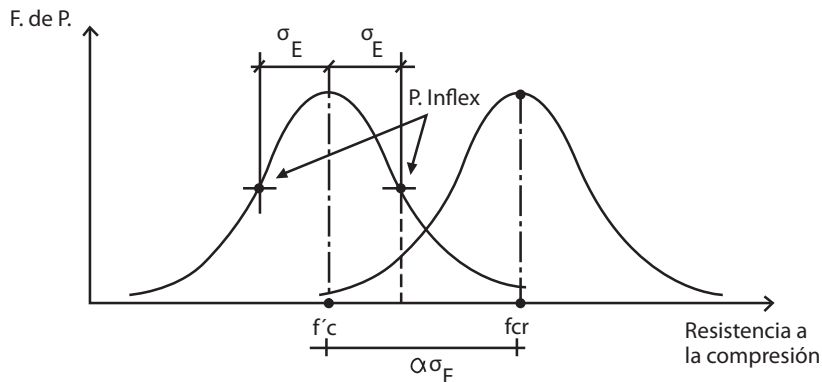
Con el uso de la estadística se puede hallar el valor promedio ( $f'cr$ ), el cual va a dar garantía del cumplimiento de las anteriores especificaciones. En el caso de conocer el valor de la desviación estándar ( $\sigma_E$ ), su promedio se puede usar realizando la siguiente fórmula:

$$f'cr = (f'c - 3,5) + 2,33 * \sigma_E \longrightarrow f'cr = f'c + 1,33 * \sigma_E$$

En el caso contrario, se debe aumentar la resistencia especificada  $f'c$  si:

1.  $f'c < 21$  Mpa  $\longrightarrow f'cr = f'c + 7$  MPa
2.  $21 < f'c < 35$  Mpa  $\longrightarrow f'cr = f'c + 8,5$  MPa
3.  $f'c > 35$  Mpa  $\longrightarrow f'cr = 0,1 * f'c + 5$  Mpa

**Figura 46. Relación entre  $f'c$  y  $f'cr$**



Fuente: Giraldo Bolivar (2006).

#### 4.1.1.3. Características del ambiente y dimensiones de la estructura

De forma experimental se ha comprobado que, mediante el control de la relación agua-cemento (A/C) se puede conseguir la vida útil deseada, además, también se tiene en cuenta cómo afecta el medio ambiente a la estructura y cómo cambian sus características, con esta información se diseñaron tablas que determinan los valores

máximos que debe tener esta relación, aunque también puede ser especificado por el ingeniero estructural.

**Tabla 25. Valores máximos en la relación A/C**

Tipo de estructura	Condiciones de exposición	
	Exposición 1	Exposición 2
Sección delgada	0,45	0,4
Otras estructuras	0,5	0,45

Fuente: Giraldo Bolivar (2006).

Teniendo en cuenta que:

- Exposición 1: exposición a los sulfatos o el agua de mar.
- Exposición 2: cuando se presenta frecuente humedad o a hielo-deshielo.

#### 4.1.1.4. Características de los materiales

Antes del estudio previo de la dosificación se debe tener conocimiento de las propiedades que forman el concreto, por eso se deben evaluar las características mecánicas, físicas y químicas de los materiales y confrontarlas con la respectiva norma.

En el caso del cemento, se debe hacer cumplimiento de la norma NTC-121 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2021a). Para ello hay que saber los siguientes datos:

1. Densidad, según la norma NTC-221 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1999), es la relación entre la masa solidada del cemento y su volumen sólido ocupado con una temperatura entre 19 a 23 °C. Para el cemento *Portland* se tienen un valor aproximado de 3,15 Mg/m<sup>3</sup>.
2. Resistencia del cemento. Según la norma NTC-220 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2004b), los parámetros  $k_1$  y  $k_2$  son fundamentales para conocer la relación A/C, teniendo en cuenta los requisitos de resistencia que se especifiquen para el concreto.

$$f'_{cr} = \frac{k_1}{k_2^{A/c}} \text{ (Mpa)}$$

Para conocer el valor de A/C se debe tener el resultado de la resistencia a la compresión del concreto después de 28 días.

**Tabla 26. Relación entre la resistencia del cemento y las constantes  $k_1$  y  $k_2$** 

Resistencia del cemento (Mpa)	$k_1$	$k_2$
< 20	75	14,5
25 – 30	90	13
30 – 35	110	12,5
35 – 40	130	11
>40	145	10,5

Fuente: Giraldo Bolivar (2006).

El agregado fino se define bajo la norma NTC -174 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2018), la cual indica que se deben conocer los siguientes datos:

1. Módulo de finura: se debe realizar por medio de un estudio granulométrico del material, según la norma NTC-77 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2007).
2. Densidad en bruto seco: es la relación entre la masa seca sólida y el volumen en bruto del material, su dato sirve para la estimación de la composición de la mezcla en la norma NTC-237 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1995b).
3. Humedad de absorción: es el valor de la cantidad de agua que se almacena en los poros interiores y exteriores del material, que se determina mediante la norma NTC-237 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1995b).
4. Humedad superficial: es el exceso de agua en la absorción que posee el agregado, este valor se halla por medio de algún método rápido y practico que tenga correlación con el estándar de la norma NTC-1776 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019d).

Para el agregado grueso se tiene en cuenta la norma NTC-174 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2018) en donde se debe conocer:

1. El tamaño máximo del agregado según la norma NTC-77 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2007).
2. La densidad en bruto y la humedad de absorción, teniendo en cuenta la norma NTC-176 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019c).
3. La humedad superficial, según la norma NTC-1776 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019d).
4. La masa unitaria seca y compactada con varilla y la forma de las partículas, según la norma NTC-92 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019g).



#### 4.1.1.5. Dosificación inicial

##### 4.1.1.5.1. Cálculo de la cantidad inicial de agua y del porcentaje de aire atrapado

Para conservar el valor inicial del porcentaje de aire atrapado y la cantidad inicial de agua, este método recomienda utilizar los valores de la siguiente tabla como datos iniciales.

**Tabla 27. Valores aproximados de agua de mezclado y el contenido de aire**

Asentamiento (mm)	Tamaño máximo del agregado (mm)							
	10	12,5	20	25	40	50	70	150
25 - 50	205	200	185	180	160	155	145	125
75 - 100	225	215	200	195	175	170	160	140
150 - 175	260	230	210	205	185	180	170	----
% de aire atrapado	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

Fuente: Giraldo Bolivar (2006).

En esta tabla se tienen en cuenta los agregados con forma angular, en el caso de agregados con una forma redondeada se debe corregir la cantidad de agua, en el método ACI 211.1 recomiendan disminuirla a 18 kg.

Para conseguir una aproximación razonable se utiliza la siguiente ecuación:

$$W = 218,8 s^{0,1} / TM^{0,18}$$

Teniendo en cuenta que:

- W: contenido del agua para un m<sup>3</sup> de concreto (Kg).
- s: asentamiento (mm).
- TM: tamaño máximo del agregado (mm).

También hay que tener en cuenta que existen otras tablas que pueden ser utilizadas para determinar la cantidad inicial de agua, pero aun así los rangos de asentamiento suelen ser muy amplios.

##### 4.1.1.5.2. Cálculo del contenido inicial de cemento

Primero se debe conocer la relación agua-cemento (A/C) que se necesita para la resistencia (A/C)<sub>R</sub>, la cual se debe comparar con la que se requiere para la durabilidad (A/C)<sub>D</sub>. Para calcular el contenido del cemento se debe escoger, de manera definitiva, lo que se usará en el proyecto.

**Tabla 28. Relación entre la A/C y la resistencia a la compresión**

Resistencia a la compresión después de 28 días (Mpa)(f'cr)	A/C Cemento R20	A/C Cemento R25	A/C Cemento R30
20	0,49	0,59	
25	0,41	0,5	0,59
30	0,34	0,43	0,51
35		0,37	0,45
40		0,32	0,4
45			0,35
50			0,31

Fuente: Giraldo Bolivar (2006).

Considerando que el cemento es el material más costoso de la mezcla es necesario, en muchos casos, buscar la manera de minimizar su cantidad, pero para eso es fundamental considerar la durabilidad y la resistencia de la mezcla, por eso el siguiente paso es escoger la A/C menor que va a ser usada en todo el proyecto.

$$A/C = \text{menor} \{A/C_D, A/C_R\}$$

Cuando ya se tiene el valor se encuentra la cantidad del cemento en m<sup>3</sup>.

$$C_1 = \frac{W_1}{A/C}$$

#### 4.1.1.5.3. Cálculo de la cantidad de agregado grueso inicial

El American Concrete Institute (ACI) recomienda que, según los agregados y el asentamiento de la cantidad de agua, se debe mantener constante el volumen de agregado grueso para conservar misma trabajabilidad y la A/C. Por ello, los volúmenes de agregados dependen de su tamaño máximo y del módulo de finura de la arena.

**Tabla 29. Volumen de agregados grueso seco y compactado con varilla**

Tamaño máximo agregado grueso	Módulo de finura de la arena (MF)			
	2,4	2,6	2,8	3
3/8"	0,5	0,48	0,46	0,44
1/2"	0,59	0,57	0,55	0,53
3/4"	0,66	0,64	0,62	0,6
1"	0,71	0,69	0,67	0,65
1 1/2"	0,76	0,74	0,72	0,7

Tamaño máximo agregado grueso	Módulo de finura de la arena (MF)			
	2,4	2,6	2,8	3
2"	0,78	0,76	0,74	0,72
3"	0,8	0,79	0,77	0,75
6"	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: Giraldo Bolivar (2006).

En esta tabla se puede presenciar saltos y deficiencias en el valor del módulo de finura de arena, por lo que se hace necesario el uso de extrapolaciones para cubrir los casos no deseados.

En algunos casos, no es posible leer el módulo de finura de manera directa en las tablas, así que se utilizan ecuaciones de segundo grado para cada uno de los tamaños máximos:

$$TM = \frac{1}{2}'' \quad \text{Vol. Gruesos (m}^3\text{)} = 0,7275 + 0,0094MF - 0,0281MF^2$$

$$R^2 = 0,9809$$

$$TM = \frac{3}{4}'' \quad \text{Vol. Gruesos (m}^3\text{)} = 0,7926 + 0,0131MF - 0,0182MF^2$$

$$R^2 = 0,0,9924$$

$$TM = 1'' \quad \text{Vol. Gruesos (m}^3\text{)} = 0,7981 + 0,0350MF - 0,0294MF^2$$

$$R^2 = 0,9823$$

$$TM = 1 \frac{1}{2}'' \quad \text{Vol. Gruesos (m}^3\text{)} = 0,8435 + 0,0078MF - 0,0136MF^2$$

$$R^2 = 0,9834$$

$$TM = 2'' \quad \text{Vol. Gruesos (m}^3\text{)} = 0,8211 + 0,0246MF - 0,0187MF^2$$

$$R^2 = 0,9930$$

**Tabla 30. Volúmenes de agregado grueso seco y compactado con varilla**

Tamaño máximo de agregados gruesos	Módulo de finura de la arena (MF)								
	0	1	2	2,4	2,75	3,1	4	5	6
3 / 8"	0,7	0,63	0,54	0,5	0,45	0,39			
1 / 2"	0,74	0,69	0,61	0,57	0,53	0,48	0,3		
3 / 4"	0,8	0,75	0,68	0,65	0,62	0,58	0,44		
1"	0,82	0,78	0,72	0,69	0,66	0,63	0,51	0,21	
1 1/2"	0,85	0,81	0,76	0,73	0,71	0,68	0,59	0,38	
2"	0,87	0,83	0,79	0,76	0,74	0,71	0,64	0,47	
3"	0,89	0,86	0,82	0,8	0,78	0,76	0,64	0,56	0,21
6"	0,93	0,91	0,87	0,86	0,84	0,82	0,76	0,66	0,51

Fuente: Giraldo Bolivar (2006).

Cuando ya se tiene determinado el volumen, se debe calcular la cantidad necesaria de agregado grueso por metro cúbico de concreto.

$$G_1 = V_{gsc} * MU_{sc} G_{1sss} = G_1 \left( 1 + \frac{h_{ag}}{100} \right)$$

Teniendo en cuenta:

- G1: masa del agregado grueso seco por metro cúbico de cemento.
- G1sss: masa del agregado grueso saturado por metro cúbico de concreto.
- Vgs: volumen de agregado grueso seco y compactado con varilla para un metro cúbico de hormigón.
- MUsc: masa unitaria del agregado gruesos eco y compactado con varilla.
- Hag: humedad de absorción del agregado grueso.

#### **4.1.1.5.4. Cálculo de la cantidad de agregado fino inicial**

Para conocer la cantidad de agregados finos, este método presenta los siguientes cálculos:

$$V_W + V_A + V_C + V_G + V_F = 1$$

Donde:

- $V_W$ : volumen absoluto del agua (m3).
- $V_A$ : volumen absoluto del aire (m3).
- $V_C$ : volumen absoluto del cemento (m3).
- $V_G$ : volumen absoluto del agregado grueso (m3).
- $V_F$ : volumen absoluto del agregado fino (m3).

Con los valores obtenidos en la recolección de datos se puede conseguir la masa de los finos saturados:

$$F_{sss} = (1 - A_1 - \frac{W_1}{D_w} - \frac{C_1}{D_c} - \frac{G_{1sss}}{D_{qsss}}) D_{fsss}$$

Teniendo en cuenta que:

- F1sss: masa de los finos saturados (Kg).
- W1: masa de agua (Kg).
- Dw: densidad del agua (1000Kg/m3) a 20 °C.
- A1: volumen de aire atrapado.
- C1: masa del cemento (Kg).
- Dc: densidad del cemento (Kg/m3).

- $G_{1ss}$ : masa de la grava saturada (Kg).
- $D_{gss}$ : densidad en bruto saturada de los gruesos (Kg/m<sup>3</sup>).
- $D_{fss}$ : densidad en bruto saturada de los finos (Kg/m<sup>3</sup>).

Se usa la siguiente ecuación para conseguir la cantidad de finos secos:

$$F_1 = F_{ss} / (1 + h_{af} / 100)$$

Esos procedimientos son necesarios para conocer la dosificación inicial que se requiere para elaborar la primera mezcla, teniendo en cuenta la norma NTC-1377 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2021b). También es importante realizar ensayos de asentamiento, según la norma NTC-396 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2021c), y de masa unitaria, según la norma NTC-1926 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2013).

Para estos ensayos la cantidad de mezcla, por lo general, es de 0,015 m<sup>3</sup>, sin embargo, después de realizar cálculos, siempre se deben realizar las respectivas correcciones por asentamiento.

En la dosificación inicial se anotan los valores antes de medir y mezclas, así, cuando se hagan los cálculos se podrá corregir la humedad de los agregados.

Se halla el valor inicial con la siguiente fórmula:

$$DH = W_1 + C_1 + F_{1ss} + G_{1ss}$$

Donde:

- $W_1$ : agua.
- $C_1$ : cemento.
- $F_1$ : finos.
- $G_1$ : gruesos.
- $DH$ : densidad teórica del concreto.

#### 4.1.1.6. Mezclas de prueba

Los agregados cuentan con una porosidad donde se almacena cierta cantidad de agua que no logra reaccionar con el cemento y, a su vez, no hace parte de los valores obtenidos en las dosificaciones anteriores, por eso se debe considerar que, al momento de elaborar la mezcla, se haga una corrección en las medidas para la cantidad de agua.

Si no se tiene en cuenta esta precisión, se generarán variaciones con la relación A/C, es decir, afectará la trabajabilidad de la mezcla.

Estas correcciones son llamadas correcciones por humedad, sin embargo, hay que tener en cuenta que no hacen parte del método ACI 211.1, aun así, resultan importantes para realizar los ensayos de asentamiento, masa unitaria y resistencia a la compresión.

Hay que tener en cuenta los siguientes valores de la mezcla:

- W: agua.
- C: cemento.
- F: finos.
- G: gruesos.

Según la norma NTC-1776 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2019d), se debe volver a calcular la cantidad de agua, el agregado grueso y el agregado fino, pero ahora considerando el valor de humedad que estos poseen.

- **Cantidad de agua por metro cúbico de concreto corregida por humedad**

$$W_h = W + F * \frac{h_{af} - h_f}{100} + G * \frac{h_{ag} - h_g}{100}$$

- **Cantidad de finos por metro cúbico de concreto corregidos por humedad**

$$F_h = F * \left(1 + \frac{h_f}{100}\right)$$

- **Cantidad de gruesos por metro cúbico de concreto corregidos por humedad**

$$R = \frac{w' + c + f + g}{DH_R}$$

Considerando a:

- $H_{ag}$ : humedad de absorción del agregado grueso.
- $H_{af}$ : humedad de absorción de los finos.

Estos cálculos son los que se deben realizar antes de elaborar las mezclas.

#### 4.1.1.7. Corrección por asentamiento y densidad del concreto

Al momento de comprobar si las proporciones son las indicadas para el asentamiento se debe realizar la mezcla siguiendo la norma NTC-1377 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2021b) con la cantidad de los materiales corregidos por humedad. Considerando que  $V_s$  es el volumen de la mezcla, se realizan los siguientes cálculos:

w:	agua →	$w = W_{(th)} * V_s$
c:	cemento →	$c = C_{(th)} * V_s$
f:	finos →	$f = F_{(th)} * V_s$
g:	gruesos →	$g = G_{(th)} * V_s$

Para saber cuánta cantidad de  $w'$  se debe utilizar en la mezcla, se debe considerar:

1. Se puede concluir que la cantidad inicial de agua es la adecuada si el asentamiento medido con  $w'$  es distinto al valor considerado en los datos iniciales, el rango de asentamiento es aproximadamente de 10 mm y  $w'$  es igual a  $w$ .
2. Cuando el valor del asentamiento medido con  $w'$  es diferente al valor considerado en los datos iniciales se deben agregar, por cada 10 mm de diferencia, dos litros por metro cúbico de la mezcla de concreto.

Después de evaluar si el asentamiento de la mezcla mantiene la densidad real del hormigón, y se corrigen las proporciones iniciales con los datos conseguidos, se calcula el rendimiento de la mezcla de la siguiente forma:

$$R = \frac{w' + c + f + g}{DHR}$$

Teniendo en cuenta que:

- R: rendimiento de la mezcla.
- DHR: densidad real según la norma NTC-1926 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2013).
- **Cálculo de la nueva cantidad de agua por metro cúbico de concreto**

$$W_2 = \frac{w'}{R}$$

Hay que tener presente que la  $w'$  depende de que los agregados estén húmedos, si es este el caso se le debe agregar la humedad superficial. Si los agregados están secos se le va a restar la humedad de absorción.

- **Cálculo de la nueva cantidad de cemento por metro cúbico de concreto**

$$C_2 = \frac{W_2}{A/C}$$

- **Cálculo de la nueva cantidad de agregado grueso por metro cúbico de concreto**

$$G_2 = \frac{G_1 * V_s}{R} G_{2SSS} = G_2 \left(1 + \frac{h_{ag}}{100}\right)$$

En donde:

- G2: masa de los agregados gruesos secos corregidos por asentamiento.
- G1: masa de los agregados secos hallados en la primera mezcla.
- Vs: volumen de la mezcla de prueba.
- **Cálculo de la nueva cantidad de agregado fino por metro cúbico de concreto**

Finos saturados superficialmente secos:  $F_{2sss} = DH_2 - W_2 - C_2 - G_{2sss}$

Finos secos por metro cúbico:  $F_2 = \frac{F_{2sss}}{(1 + \frac{h_{af}}{100})}$

En el caso de que el asentamiento medido este aproximadamente a los 10 mm del valor especificado en los datos iniciales, solo se deberá corregir la mezcla por densidad, en donde variará el contenido del agua, del cemento, de los finos y de los gruesos.

En este caso, se sigue un procedimiento igual al anterior, pero igualando  $w'$  a cero. En la segunda dosificación, por medio de una segunda mezcla, se realizarán los ensayos de resistencia según la norma NTC-673 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2021d).

A la segunda dosificación se le realizan las respectivas correcciones de los agregados.

- W2: agua.
- C2: cemento.
- F2: finos.
- G2: gruesos.

$$DH = W_2 + C_2 + F_{2sss} + G_{2sss}$$

#### 4.1.1.8. Corrección por resistencia

Después de que se realiza la prueba de resistencia a la compresión, se procede a conseguir el valor promedio de todas las probetas ensayadas.

$$f_{c_{prom}} = \frac{\sum f_{c_i}}{n} v = \frac{f_{c_{max}} - f_{c_{min}}}{t(f_{c_{prom}})}$$

Donde:

- $f_c$ : probetas ensayadas.
- n: número de probetas.



- $f_c$ : resistencia a la compresión de la probeta  $i$  después de 28 días.
- $t$ : depende del número de probetas ( $n=2, t=1,128; n=3; t=1,693$ ).

Cuando se obtiene el valor de la resistencia promedio de las probetas ( $f_{c_{prom}}$ ) se debe comparar con el valor de la resistencia promedio ( $f'_{cr}$ ), que se rectifica en los datos iniciales, si la diferencia existente entre ambas es menor al 5 %, no se necesita realizar correcciones a la modificación por resistencia; pero si es mayor al 5 %, se deben realizar los ajustes correspondientes.

- **Cálculo de la nueva cantidad de agua por metro cúbico de concreto**

El contenido de agua inicial no se debe modificar para mantener la trabajabilidad de la mezcla ( $W_2 = W_3$ ).

- **Cálculo de la nueva cantidad de cemento por metro cúbico de concreto**

Se debe ajustar la ecuación de Abrams con el objetivo de obtener un nuevo valor para  $k_2$ , al que se le denominara  $*k_2$ , que se debe despejar para conseguir una fórmula para la nueva relación  $*A/C$ .

Ecuación de Abrams: 
$$f_{c_{prom}} = \frac{k_1}{*k_2^{A/C}}$$

Despeje de  $*k_2$ : 
$$*k_2 = \frac{\ln(k_1) - \ln(f_{c_{prom}})}{A/C}$$

Despeje de  $*A/C$ : 
$$*A/C = \frac{\ln(k_1) - \ln(f_{c_{prom}})}{*k_2}$$

Con el nuevo valor de la relación  $*A/C$  se puede calcular la nueva cantidad de cemento requerido por metro cúbico de concreto ( $C_3$ ):

$$C_3 = \frac{W_3}{*A/C}$$

- **Cálculo de la nueva cantidad de gruesos por metro cúbico de concreto**

Los agregados gruesos se mantienen con el mismo valor para conservar la trabajabilidad de la mezcla, también para seguir con el mismo cálculo para la resistencia.

$$G_3 = G_2 \quad G_{3_{SSS}} = G_3 \left(1 + \frac{h_{ag}}{100}\right)$$

- **Cálculo de la nueva cantidad de finos por metro cúbico de concreto**

Se mantienen las mismas fórmulas utilizando los valores que se han obtenido anteriormente:

Finos saturados superficialmente secos:  $F_{3SSS} = DH_R - W_3 - C_3 - G_{3SSS}$

Finos secos por metro cúbico:  $F_3 = \frac{F_{3SSS}}{(1 + \frac{h_{af}}{100})}$

En este método se cuenta con una tercera dosificación, a la cual se le debe hacer el mismo procedimiento que en el punto ‘mezclas de prueba’ para probar la resistencia.

- W3: agua.
- C3: cemento.
- F3: finos.
- G3: gruesos.

$$DH = W_3 + C_3 + F_{3SSS} + G_{3SSS}$$

Al probar nuevamente la resistencia por medio del ensayo de compresión, rectificando los datos obtenidos, se debe asegurar que la mezcla cumpla con los requisitos especificados. La diferencia entre la resistencia promedio de las probetas y la resistencia promedio debe ser menor al 5 % para considerarse la dosificación final, si no cumple con esta especificación se debe realizar otra vez el procedimiento.

#### **4.1.2. Método Weymouth y Fuller**

Este método se considera analítico porque intenta llegar a la dosis final de una manera práctica haciendo correcciones sucesivas por asentamiento y resistencia, sin llegar a cambiar los valores necesarios para conservar la trabajabilidad.

Los métodos analíticos resultan ser más rigurosos en la relación entre las propiedades del concreto y de los agregados, teniendo como ventaja la posibilidad de realizar cambios a los agregados para obtener una granulometría más compacta. En este caso se trabaja con una curva que cuenta como función la siguiente expresión:

$$y = 100 \left(\frac{d}{D}\right)^n$$

En donde:

- D: tamaño máximo del agregado total.
- y: porcentaje en peso del agregado que pasa a través del tamiz.

- d: tamaño de la abertura del tamiz.
- n: potencia granulométrica que varía entre 0,2 y 0,5.

#### 4.1.2.1. Recopilación de datos

En este método también se debe contar con información sobre la estructura y los materiales que se van a utilizar para poder establecer las variables primordiales en el proyecto.

##### 4.1.2.1.1. Condiciones de colocación

Al momento de medir la trabajabilidad de la mezcla se deben considerar ciertos factores como la formaleta, el método de vibrado, la forma en que se va a transportar, la textura final y las necesidades de bombeo. También se deben considerar las variables mencionadas en la NTC-396 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones, 2021c).

##### 4.1.2.1.2. Requisitos de resistencia

La resistencia del concreto a la compresión ( $f'c$ ) depende de la estructura, por ello se debe especificar. Estos datos se suelen encontrar en los planos y en las memorias estructurales, aunque también se pueden obtener por medio de ensayos en probetas estándar con un tiempo definido.

##### 4.1.2.1.31. Experiencia en el diseño de mezclas, características del ambiente y dimensiones de la estructura y características de los materiales

En la recolección inicial de estos datos, las consideraciones y los procedimientos son los mismos que en el método ACI 211.1, excepto por el hecho de que el método de Weymouth y Fuller permite utilizar más de 2 agregados, siendo 6 agregados la cantidad máxima permitida, de los cuales es necesarios conocer la granulometría, la humedad de absorción y el peso específico en bruto seco.

#### 4.1.2.2. Dosificación inicial

- **Cálculo de la cantidad de agua**

$$W = 218,8 s^{0,1} / TM^{0,18}$$

Teniendo en cuenta que:

- W: contenido del agua para un m<sup>3</sup> de concreto (Kg).
- s: asentamiento (mm).
- TM: tamaño máximo del agregado (mm).

- **Cálculo del contenido de cemento**

Se debe establecer qué relación A/C es menor, la  $(A/C)_R$  o la  $(A/C)_D$ .

$$A/C = \text{menor} \{A/C_D, A/C_R\}$$

Cuando ya se tiene el valor se encuentra la cantidad del cemento en  $m^3$ .

$$C_1 = \frac{W_1}{A/C}$$

- **Determinación de las proporciones de agregados en la mezcla**

Para este paso se utiliza el método de módulos de finura, en el cual se tiene en cuenta el número de los agregados, donde cada uno corresponde a un módulo de finura ( $MF_1, MF_2$ , etc.).

$MFF_1, MFF_2, \dots, MFF_x$  se relacionan con la curva de Fuller, donde los tamaños máximos concuerdan con los agregados.

Por esto se puede plantear un sistema de ecuaciones con  $x$  incógnitas que sería el siguiente:

$$t_1 + t_2 + \dots + t_x = 1$$

Como se relaciona el módulo de finura con la curva de Fuller se puede plantear lo siguiente:

$$MFF_i = \frac{MF_1 * t_1 + MF_2 * t_2 + \dots + MF_i * t_i}{t_1 + t_2 + \dots + t_x}$$

La siguiente expresión es la solución a este sistema de ecuaciones:

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

$$t_i = (t_1 + t_2 + \dots + t_i) - (t_1 + t_2 + \dots + t_{i-1})$$

En donde  $t_1 + t_2 + \dots + t_i$  se puede obtener de la siguiente forma:

$$(t_1 + t_2 + \dots + t_i) = (t_1 + t_2 + \dots + t_i) \left( \frac{MF_{i+1} - MFF_{i+1}}{MF_{i+1} - MF_{i+1}} \right)$$

Considerando que se varia  $i$  desde  $x-1$  hasta 2.

Después de determinar los porcentajes de los agregados se continua con determinar la masa seca de cada uno, teniendo en cuenta que para conseguir un metro cubico de concreto se necesitan  $1025 m^3$  de componentes.

$$Ag(1)_1 = t_i * \left( 1025 - \frac{W(1)}{D_w} - \frac{C(1)}{D_c} \right) * D_{si}$$

Considerando que:

- Ag(1): masa seca de agregado i para metro cúbico de concreto (Kg).
- ti: proporción del agregado i en el volumen total de agregados.
- W(1): masa de agua para metro cúbico de concreto (Kg).
- C(1): masa de cemento para metro cúbico de concreto (Kg).
- Dc: densidad del cemento (Kg/m3).
- Dsi: densidad en bruto seco del agregado (Kg/m3).

En la dosificación inicial se tiene en cuenta el número de agregados.

- W(1): agua.
- C(1): cemento.
- Ag(1)<sub>1</sub>, Ag(1)<sub>2</sub>...Ag(1)<sub>x</sub>: agregados secos.
- DH: densidad teórica del concreto.

$$DH = W(1) + C(1) + \sum Ag(1)_i * \left( 1 + \frac{h_{ai}}{100} \right)$$

#### 4.1.2.3. Mezcla de prueba - corrección por humedad

Al momento de preparar una mezcla se sabe que los agregados se encuentran húmedos, esto se debe corregir en las dosificaciones para trabajar con la humedad actual. Esta corrección es fundamental para realizar los ensayos de asentamiento, masa unitaria y de resistencia a la compresión.

- W: agua.
- C: cemento.
- Ag1, Ag2 ... Agx: agregados secos.

Considerando que se debe variar i desde 1 hasta n.

- **Cantidad de agua por metro cúbico de concreto corregido por humedad**

$$W_h = W + \sum (Ag_i * \frac{h_{ai} - h_i}{100})$$

En donde:

- h<sub>ai</sub>: humedad de absorción del agregado i (%).
- h<sub>i</sub>: humedad de la agregado i (%).

- **Cantidad de agregado por metro cúbico de concreto corregido por humedad**

$$Ag_{hi} = Ag_i \left(1 + \frac{h_i}{100}\right)$$

#### 4.1.2.4. Corrección por asentamiento

Antes de empezar con la corrección por asentamiento se debe preparar una mezcla con un volumen ( $V_s$ ) con los nuevos datos de humedad.

$$w = w_h * V_s \quad c = C(1) * V_s$$

$$a_1 = Ag(1)_{1h} * V_s \quad a_2 = Ag(1)_{2h} * V_s \quad a_x = Ag(1)_{xh} * V_s$$

Después se calcula el rendimiento de la mezcla:

$$R = \frac{w' + w + c + \sum a_i}{DH_R}$$

$$w' = \text{agua adicional agregada} + (w'' * V_s)$$

$$w'' = (AE - AO)0,2$$

- w: agua.
- c: cemento.
- a1, a2 ... ax: agregados secos.
- W(1)h: agua corregida por humedad.
- DHR: densidad real medida según la norma NTC 1926.
- AE: asentamiento especificado (mm).
- AO: asentamiento obtenido (mm).
- **Cálculo de la nueva cantidad de agua por metro cúbico de concreto**

$$W(2) = \frac{w' + W(1) * V_s}{R}$$

- **Cálculo de la nueva cantidad de cemento por metro cúbico de concreto**

$$C(2) = \frac{W(2)}{A/C}$$

- **Cálculo de las nuevas cantidades de agregado seco por metro cúbico de concreto**

Las siguientes fórmulas son para calcular la masa de cada uno de los agregados secos a partir del segundo en adelante:

$$Ag(2)_i = \frac{Ag(1)_i * V_s}{R}$$

$$Ag(2)_i = \frac{MU_R - W(2) - C(2) - \sum_{i=2}^x Ag(2)_i * \left(1 + \frac{h_{ai}}{100}\right)}{1 + \frac{h_{ai}}{100}}$$

Teniendo en cuenta que:

- $Ag(2)_i$ : masa del agregado  $i$  seco después de la corrección por asentamiento (Kg).
- $Ag(1)_i$ : masa del agregado  $i$  seco de la primera mezcla (Kg).
- $V_s$ : volumen de la mezcla de prueba (m<sup>3</sup>).
- $R$ : rendimiento (m<sup>3</sup>).
- $MU_R$ : masa unitaria medida en el ensayo.

En esta segunda dosificación con corrección por asentamiento se vuelve a hacer una mezcla, a la que se le hace el ensayo de resistencia a la compresión.

- $W(2)$ : agua.
- $C(2)$ : cemento.
- $Ag(2)_1, Ag(2)_2, \dots, Ag(2)_x$ : agregados secos.
- $DH$ : densidad teórica del concreto.

$$DH = W(2) + C(2) + \sum Ag(2)_i * \left(1 + \frac{h_{ai}}{100}\right)$$

#### 4.1.2.5. Corrección por resistencia

Se realizan las correcciones pertinentes y se trabaja con la nueva cantidad de agua y cemento, con estos datos se llevarán a cabo las siguientes operaciones:

- **Cálculo de las nuevas cantidades de agregado por metro cúbico de concreto**

Se hacen los cálculos a partir del segundo agregado en adelante.

$$Ag(3)_i = Ag(2)_i$$

$$Ag(3)_i = \frac{MU_R - W(3) - C(3) - \sum_{i=2}^x Ag(3)_i * \left(1 + \frac{h_{ai}}{100}\right)}{1 + \frac{h_{ai}}{100}}$$

Donde:

- $Ag(3)_i$ : masa del agregado i seco después de la corrección por resistencia (Kg).
- $Ag(2)_i$ : masa del agregado i seco después de la corrección por asentamiento (Kg).

Al conseguir la tercera dosificación, que cuenta con las correcciones por resistencia, se le vuelve a realizar el ensayo de resistencia a la compresión teniendo en cuenta la NTC-673 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2021d).

- $W(3)$ : agua.
- $C(3)$ : cemento.
- $Ag(3)_1, Ag(3)_2 \dots Ag(3)_x$ : agregados secos.
- $DH$ : densidad teórica del concreto.

$$DH = W(3) + C(3) + Ag(3)_i * \left(1 + \frac{h_{ai}}{100}\right)$$

Para finalizar se debe comprobar si la diferencia entre la resistencia promedio de las probetas y la resistencia promedio es menor al 5 %, en el caso de que no se cumpla esta condición, se debe volver a realizar correcciones (Giraldo Bolivar, 2006).





## CAPÍTULO 5

# EJERCICIO

Se desea construir un muro de contención que se ubica en una zona con ataque de sulfatos moderado, para esto se debe dosificar una mezcla teniendo en cuenta la resistencia estructural de  $f'c = 30$  Mpa. Sabemos que la zona cuenta con un registro histórico donde el concreto tiene una desviación estándar de 2,70 Mpa. El método que se va a emplear es con el uso de grúa y vibración normal.

Las propiedades de los materiales son:

**Tabla 31. Datos iniciales del cemento**

Cemento	Tipo	Densidad (Mg/m <sup>3</sup> )	Resistencia promedio (Mpa)	Desviación estándar (Mpa)
Nare	Portland 1	3,05	27,80	1,3

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 32. Datos iniciales de la arena**

Arena	Impureza orgánica (#)	Lodos (%)	Módulo de finura (#)	Densidad seca (Mg/m <sup>3</sup> )	Absorción (%)
Procopal	2	2,75	3,10	2,65	1,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla 33. Datos iniciales de la grava

Grava	Masa unitaria compactada (Mg/m <sup>3</sup> )	Lodos (#)	Tamaño máximo (mm)	Densidad seca (Mg/m <sup>3</sup> )	Absorción (%)
Agrecon	1,70	0,65	40	2,75	0,70

Fuente: elaboración propia.

Solución:

- Selección del asentamiento de la mezcla:** se utiliza como referencia la tabla 26. Teniendo en cuenta que la vibración es normal, se consigue el rango de asentamiento de 50 – 90 mm, para este ejercicio se va a sumir un asentamiento de 70 mm.
- Selección del tamaño máximo del agregado:** como se indica en la tabla de grava el tamaño es de 40 mm.
- Determinación del contenido de agua y aire en la mezcla:** observando la tabla 29, y teniendo en cuenta los anteriores valores, se van a utilizar 160 Kg/m<sup>3</sup> de concreto y un volumen de aire atrapado de 1 %.
- Determinación de la resistencia promedio de la mezcla ( $f'_{cr}$ ):**

$$f'_{cr_1} = 28 - 3,5 + 2,33 * 2,7 = 30,79 \text{ MPa}$$

$$f'_{cr_2} = 28 + 1,33 * 2,7 = 31,59 \text{ MPa}$$

Conociendo el valor de la desviación estándar se hallaron estos dos resultados, pero para este ejercicio se va a usar el valor de  $f'_{cr} = 31,59 \text{ MPa}$ .

- Estimación de la relación A/C:** considerando la tabla 27 se obtiene que para la durabilidad se cumple con la exposición 1, por ende,  $A/C_D = 0,5$ . En el caso de la resistencia del cemento, se observa la tabla 28 teniendo en cuenta que el valor es de 27,80 Mpa, así que los valores de las constantes son:  $k_1 = 90$  y  $k_2 = 13$ , además que la relación  $A/C_R = 0,41$ , el cual va a controlar el diseño.

$$\frac{160}{0,41} = 390,24 \text{ Kg}$$

- Determinación del contenido de cemento:** con los valores 0,41 y 160 Kg de la relación A/C se halla la cantidad de cemento.
- Estimación del contenido de agregado grueso:** teniendo en cuenta el módulo de finura de 3,10 y un tamaño máximo de 40 mm se revisa en las tablas 31 y 32 y se concluye que el volumen de agregado grueso seco y compactado con varilla para un m<sup>3</sup> de concreto es de 0,68.

Masa de la grava:  $G_s = 0,68 * 1700 = 1156 \text{ Kg}$

Masa de la grava saturada:  $G_{sss} = 1156 * \left(1 + \frac{0,70}{100}\right) = 1164,092 \text{ Kg}$

### 8. Determinación del contenido de arena:

Masa de arena saturada:

$$F_{sss} = \left(1 - 0,01 - \frac{160}{1000} - \frac{390,24}{3050} - \frac{1164,092}{2750 * 1,0070}\right) (2650 * 1,013)$$

$$F_{sss} = 756,18 \text{ Kg}$$

Masa de arena seca:

$$F_1 = \frac{756,18}{1 + 0,13/100} = 755,19 \text{ Kg}$$

### 9. Proporciones iniciales:

Tabla 34. Proporciones iniciales

Agua (kg)	Cemento (Kg)	Arena seca (Kg)	Grava seca (Kg)
160	390,24	755,19	1156
0,41	1	1,50	2,80

Fuente: elaboración propia.

$$DH = 2461,43 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

10. **Mezcla de prueba I:** para la preparación de la primera mezcla va a ser necesario preparar aproximadamente 7,5 litros, a los cuales se le evaluará su trabajabilidad y densidad, pero antes se debe realizar la corrección por humedad al agregado fino de 3,3 % y al agregado grueso de 1,8 %.

Agua:  $W_h = 160 + 755 * \left(\frac{3,3-1,3}{100}\right) + 1156 * \left(\frac{1,8-0,70}{100}\right) = 187,82 \text{ Kg}$

Arena húmeda:  $F_h = 755 * \left(1 + \frac{3,3}{100}\right) = 780,11 \text{ Kg}$

Grava húmeda:  $G_h = 1156 * \left(1 + \frac{1,8}{100}\right) = 1176,8 \text{ Kg}$

Tabla 35. Dosificación

Material	Agua (kg)	Cemento (Kg)	Arena húmeda (Kg)	Grava húmeda (Kg)
1 m <sup>3</sup>	187,82	390,24	780,11	1176,8
7 L	1,31474	2,73168	5,46077	8,2376

Fuente: elaboración propia.

Se obtiene un asentamiento de 65 mm y una densidad real de 2428 Kg/m<sup>3</sup> con lo cual se concluye que se deben hacer correcciones por asentamiento y densidad en la mezcla. Además, se considera que para conseguir el valor aproximado de asentamiento que es requerido se debe adicionar 100 ml de agua,

### 11. Correcciones por asentamiento y densidad:

$$R = \frac{1,31474 + 0,100 + 2,73168 + 5,46077 + 8,2376}{2428} = 0,00735 \text{ m}^3$$

$$W_2 = \frac{1,31474 + 0,100 + 0,087 + 0,104}{0,00735} = 218 \text{ Kg} = 221 \text{ Kg}$$

Como el asentamiento dio 15 mm por debajo del especificado se le debe incrementar 3 litros de agua.

$$C_2 = \frac{221}{0,41} = 539 \text{ Kg}$$

$$G_{2h} = \frac{8,2376}{0,00735} = 1121 \text{ Kg}$$

$$G_{2s} = \frac{1121}{1,018} = 1101 \text{ Kg}$$

$$G_{2sss} = 1101 * \left(1 + \frac{0,70}{100}\right) = 1109 \text{ Kg}$$

$$F_{2sss} = 2428 - 221 - 539 - 1109 = 559 \text{ Kg}$$

$$F_2 = \frac{559}{1 + \frac{1,3}{100}} = 552 \text{ Kg}$$

### 12. Proporciones corregidas por asentamiento y densidad:

Tabla 36. Correcciones por asentamiento y densidad

Agua (kg)	Cemento (Kg)	Arena seca (Kg)	Grava seca (Kg)
221	539	552	1101
0,41	1	1,15	2,10

Fuente: elaboración propia.

$$DH = 2413 \text{ Kg/m}^3$$

### 13. Revisión de la resistencia a la compresión:

En este paso se debe preparar una mezcla que cuente con un volumen aproximado de 15 L. Luego se va a evaluar la resistencia a la compresión, pero antes de empezar con los materiales se debe volver a medir la humedad

de los agregados y a realizar las respectivas correcciones, teniendo en cuenta que la humedad total de finos y la humedad total de gruesos es igual al 0%.

Arena = 552 Kg

Graba = 1101 Kg

Agua =  $221 + 0,013 \cdot 552 + 0,0070 \cdot 1101 = 236$  Kg

**Tabla 37. Dosificación final**

Material	Agua (kg)	Cemento (Kg)	Arena seca (Kg)	Grava seca (Kg)
1 m <sup>3</sup>	236	539	552	1101
15 L	3,540	8,085	8,280	16,635

Fuente: elaboración propia.

Al medir la resistencia a la compresión se obtiene un valor de 26 Mpa, el cual es inferior al promedio solicitado (31,59 Mpa), por ende, se debe realizar una modificación a las proporciones de las mezclas y revisar la resistencia.

- 14. Corrección por resistencia:** como la resistencia obtenida es un 18% menor al promedio requerido se debe disminuir la relación A/C.

$$k_2 = \exp \frac{[\ln(90) - \ln(26)]}{0,41} = 20,67$$

$$A/C = \frac{\ln(90) - \ln(31,59)}{\ln(20,67)} = 0,34$$

$$C_3 = \frac{160}{0,34} = 470$$

$G_3 = 1101$  Kg

$F_{3SSS} = 2428 - 236 - 470 - 1109 = 613$  Kg

- 15. Proporciones corregidas por resistencia:**

**Tabla 38. Correcciones por resistencia**

Agua (kg)	Cemento (Kg)	Arena seca (Kg)	Grava seca (Kg)
221	539	552	1101
0,34	1	0,95	2,03

Fuente: elaboración propia.

Con los valores obtenidos se debe realizar una revisión a la resistencia y proponer las últimas modificaciones.



## BIBLIOGRAFÍA

- 101viajes. (s.f.). *Panteón de Agripa* [fotografía]. <https://www.101viajes.com/roma/panteon-agripa>
- abc. (2018). *¿Es un «trono extraterrestre» la causa del vacío detectado en la Pirámide de Keops?* [https://www.abc.es/historia/abci-trono-extraterrestre-causa-vacio-detectado-piramide-keops-201801151134\\_noticia.html](https://www.abc.es/historia/abci-trono-extraterrestre-causa-vacio-detectado-piramide-keops-201801151134_noticia.html)
- Abaltechno. (2022). *Gardner Liquid Standards*. <https://aballtechno.blogspot.com/2020/11/gardner-liquid-standards.html>
- Aguambiente. (2005). *Balsa de homogeneización 400m3*. <https://www.aguambiente.com/portfolio/balsa-de-homogeneizacion-400m3/>
- Agustín Ortega, P. J. (2013). *Optimización del esqueleto granular mediante la utilización del método de superficie de respuestas (MSR). Diseño de mezclas* [tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio UPCT. <http://hdl.handle.net/10317/3260>
- Aldin Thune, N. (2005, marzo). *Kheops pyramid* [fotografía]. Wikipedia. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kheops-Pyramid.jpg>
- Alvarez, J. I., Martín, A., & Casado, P. J. G. (1995). Historia de los morteros. *Boletín Del Instituto Andaluz Del Patrimonio Historico*, 13, 52–59.



- Amit, K. (2008). *Clínker*. En Wikipedia. <https://es.wikipedia.org/wiki/Cl%C3%Adnker#/media/Archivo:Clinker.jpg>
- AngloAmerican. (2022). *Comienza a girar el molino de bolas*. <https://peru.angloamerican.com/es-es/quellaveco/el-proyecto/comienza-a-girar-el-molino-de-bolas>
- Archaeodontonsaurus. (2011). *Magnetite*. En Wikipedia. <https://es.wikipedia.org/wiki/Magnetita#/media/Archivo:Magnetite.jpg>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (s.f.). *NSR-98. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*.
- Bonino, L. (2008). *Due piccole sfere di clinker*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clinker\\_spheres.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clinker_spheres.jpg)
- Camelway Machinery. (s.f.). *Silo de cemento*. Consultado el 17 de agosto de 2022. <https://www.camelway.pe/planta-de-hormigon/silo-de-cemento.html>
- Camey, V. G. M. (2008). *Evaluación de la calidad de agregados para concreto en el departamento de Totonicapán*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Cárdenas Gutiérrez, J. A., Cely Calixto, N. J. y Jácome Carrascal, J. L. (2022). *Fundamentos para el diseño y control de mezcla de concreto*. Ecoe Ediciones.
- Cemix. (n.d.). Descubre la diferencia entre mortero y cemento. *Retrieved October 21, 2022*, from <https://www.cemix.com/diferencia-entre-mortero-y-cemento/>
- Cuevas, A., Amarilla, A., Meza, R., & Corvalán, R. (2019). Había una vez: historia de la Ingeniería. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 5, 15–33.
- Del Cueto, B. (2013). Historia en concreto: el desarrollo de los morteros hidráulicos y el uso del cemento en Puerto Rico. *Entorno*, 22, 12–16.
- Díaz, F. (2012). *Estructuras de hormigon armado*. <http://estructurasdehormigonarmado.blogspot.com/>
- Diliff. (2007). *Vista panorámica del Coliseo de Roma al atardecer*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Portal:Commons:Imagen\\_del\\_a%C3%B1o\\_2007/Vista\\_panor%C3%A1mica\\_del\\_Coliseo\\_de\\_Roma\\_al\\_atardecer.#/media/Archivo:Colosseum\\_in\\_Rome-April\\_2007-1-\\_copie\\_2B.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Portal:Commons:Imagen_del_a%C3%B1o_2007/Vista_panor%C3%A1mica_del_Coliseo_de_Roma_al_atardecer.#/media/Archivo:Colosseum_in_Rome-April_2007-1-_copie_2B.jpg)
- Domus Ferretería. (s.f.). *Grava Arena*. Consultado el 18 de agosto del 2022. <https://domusferreteria.com/producto/grava-arena/>
- Eddyhrbs. (2010). *Fraguado y Endurecido*. <https://www.ingenierocivilinfo.com/2010/03/fraguado-y-endurecido.html>

- Focus Technology Co. (s.f.). *Vicat aparatos para pruebas de cemento de agujas*. Consultado el 17 de agosto de 2022. [https://es.made-in-china.com/co\\_cheerjazz/product\\_Vicat-Needle-Apparatus-for-Cement-Testing\\_hhyneoggy.html](https://es.made-in-china.com/co_cheerjazz/product_Vicat-Needle-Apparatus-for-Cement-Testing_hhyneoggy.html)
- Garate Labajos, M. (2018). *Efecto de la Viruta de Acero en la Resistencia a la Compresión del Concreto* [tesis de bachillerato académico en ingeniería civil, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio VSIP.INFO. <https://vsip.info/tesis-viruta-de-acero-pdf-free.html>
- Giraldo Bolivar, O. (2003). *Manual de cementos calcáreos* (2.ª ed). Universidad Nacional de Colombia.
- Giraldo Bolivar, O. (2006). *Dosificación de mezclas de hormigón*. Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez Montilla, J. Y., Hernández Gutiérrez, A. y Muñoz Añasco, B. A. (2021). *Procedimientos y recomendaciones técnicas para la elaboración de mezclas de concreto, con agregados de uso local, en el municipio de Cumaribo, Vichada* [tesis de pregrado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional UCC. <http://hdl.handle.net/20.500.12494/43269>
- Ineltec. (2016). *Cámaras climáticas*. Consultado el 17 de agosto del 2022. <https://www.ineltec.es/es/productos/equipos-de-simulacion/camaras-climaticas/curado-de-probetas>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1991). *Norma Técnica Colombiana NTC-110: consistencia normal del cemento hidráulico*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1995a). *Norma Técnica Colombiana NTC-112: mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1995b). *Norma Técnica Colombiana NTC-237: método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1997). *Norma Técnica Colombiana NTC-111: método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1999). *Norma técnica colombiana NTC-221: método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.(2001). *Norma Técnica Colombiana NTC-3459: concretos. agua para la elaboración de concreto*.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004a). *Norma técnica colombiana NTC-118: método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de vicate.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004b). *Norma Técnica Colombiana NTC-220: determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2007). *Norma técnica colombiana NTC-77: método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.(2008). *Norma Técnica Colombiana NTC-1299: concretos. Aditivos químicos para concreto.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2009). *Norma técnica colombiana NTC-120: flexión de morteros de cemento hidráulico.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.(2013). *Norma Técnica Colombiana NTC-1926: concretos. Método de ensayo para determinar la densidad (masa unitaria), el rendimiento y el contenido de aire por gravimetría del concreto.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017). *Norma técnica colombiana NTC 224: método para determinar el contenido de aire en morteros de cemento hidráulico.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.(2018). *Norma Técnica Colombiana NTC-174: concretos. Especificaciones de los agregados para concreto.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019a). *Norma Técnica Colombiana NTC-107: método de ensayo para determinar la expansión en autoclave del cemento hidráulico.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019b). *Norma Técnica Colombiana NTC-129: práctica para la toma de muestras de agregados.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019c). *Norma Técnica Colombiana NTC-176: método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019d). *Norma Técnica Colombiana NTC-1776: método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados.*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.(2019e). *Norma Técnica Colombiana NTC-3493: cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, para uso en el concreto.*

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019f). *Norma Técnica Colombiana NTC-78: método de ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz n.º 200*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019g). *Norma Técnica Colombiana NTC-92: método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021a). *Norma Técnica Colombiana NTC-121: especificación de desempeño para cemento hidráulico*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021b). *Norma Técnica Colombiana NTC-1377: concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021c). *Norma Técnica Colombiana NTC-396: concretos. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021d). *Norma Técnica Colombiana NTC-673: concretos. Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021e). *Norma Técnica Colombiana NTC-721: especificación de desempeño para cemento hidráulico*.
- Interveira. (s.f.). *Trituración Primaria*. Consultado el 17 de agosto del 2022. <https://www.interveira.com/aridos-y-mineria/trituracion-primaria-machaqueo/>
- Kobzev, D. (s.f.). *Tierra de la arcilla del fondo con los terrones encendidos naturalmente*. Dreamstime. <https://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-terrones-de-la-tierra-de-la-arcilla-image70688226>
- La razón.co. (2019). *Coliseo Romano* [fotografía]. <https://larazon.co/tendencias/reconstruiran-el-coliseo-romano-en-2021/>
- Materiales JyG. (2018). *Agregados*. <http://www.materialesjyg.com/agregados.html>
- Mattes, R. (2016, 16 de noviembre). *La Gran Muralla China* [fotografía]. National Geographic. [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/gran-muralla-china-mayor-obra-ingenieria-mundo\\_8272](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/gran-muralla-china-mayor-obra-ingenieria-mundo_8272)
- Mosquera Gómez, S. (2019). *Métodos de optimización de muestras granulométricas utilizadas en el diseño de mezcla de concreto simple hidráulico* [tesis de tecnología, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional Biblioteca UDFJC. <http://hdl.handle.net/11349/16154>

- MPF. (2006). *Teidepumice*. En Wikipedia. <https://es.wikipedia.org/wiki/Pumita#/media/Archivo:Teidepumice.jpg>
- Muñoz, I. (2020, 16 de enero). *Lo que debes saber para realizar un ensayo a cilindros de concreto*. Información Básica de ingeniería civil. <https://infobasicingcivil.blogspot.com/2020/01/lo-que-debes-saber-para-realizar-un.html>
- Murch, B. (2009). *Magnetita Fe<sub>2</sub>+(F<sub>2</sub>)<sub>3</sub>+O<sub>4</sub>. Córdoba, Argentina*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Museo\\_de\\_La\\_Plata\\_-\\_Magnetita.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Museo_de_La_Plata_-_Magnetita.jpg)
- Ordóñez, Á. y Eguez Alava, H. (2009). *Comportamiento de hormigón simple mezclado con polvo reactivo* [tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio DSpace. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/1166>
- Ormac. (2021). *5 cosas que no sabías del Compactador/Pisón Canguro*. <https://www.ormac.com.ar/index.php/blog/133-5-cosas-que-no-sabias-del-compactador-pison-canguro>
- Ospina Lozano, S. E., Nieves Castro, C. A. y López Velandia, A. M. (2017). Análisis comparativo de mezclas suelo cemento modificadas con materiales no biodegradables. *Metodología de la Portland Cement Association. Infraestructura Vial*, 19(33), 5–14.
- Pascal Terjan. (2012). *Mica*. En Wikipedia. [https://es.wikipedia.org/wiki/Mica#/media/Archivo:Mica\\_\(6911818878\).jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Mica#/media/Archivo:Mica_(6911818878).jpg)
- Pasquel, E. (1997). *Reacción alcali-agregado: El VIH del concreto*. Sección del laboratorio del concreto.
- Rabax63. (2018). *Das Pantheon in Rom. Im Vordergrund steht der ägyptische Obelisco Macuteo*. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pantheon\\_Rom\\_2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pantheon_Rom_2.jpg)
- Reyes Estrada, P. (2013). Desarrollo de gráficos para el control de calidad del concreto hidráulico. [Universidad autónoma del estado de México]. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/62522/DESARROLLO+DE+GR%C3%81FICOS+PARA+EL+CONTROL+DE+CALIDAD+DEL+CONCRETO+HIDR%C3%81ULICO.pdf?sequence=1>
- Rodgers, L. (2018, 17 de diciembre). *La enorme fuente de emisiones de CO<sub>2</sub> que está por todas partes y que quizás no conocías*. BBC. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- Rojinegro81. (2014). *Roca granito*. En Wikipedia. [https://es.wikipedia.org/wiki/Granito#/media/Archivo:Roca\\_Granito.JPG](https://es.wikipedia.org/wiki/Granito#/media/Archivo:Roca_Granito.JPG)
- Rubi Blog. (2022, 24 de mayo). *Cemento portland, ¿qué es y cuáles son sus ventajas?*. <https://www.rubi.com/es/blog/cemento-portland-que-es/>

- Shaikh, R. y Mahanwar, P. (2018). Reclamation of Used Engine Oil Using Polymeric Flocculants. *International Journal of Chemical Sciences*, 16(2). <https://doi.org/10.21767/0972-768X.1000254>
- Significado de las piedras. (s.f.). *Significado de la piedra Pirita de Hierro*. Consultado el 18 de agosto del 2022. <https://significadodelaspiedras.com/semipreciosas/pirita-de-hierro/>
- Simonnet, C. (2009). *Hormigón: Historia de un material*. Editorial Nerea.
- Tostado, F. J. (2014). *La Gran Muralla y su «ingrediente» secreto*. <https://francisco-javiertostado.com/2014/11/12/la-gran-muralla-y-la-harina-de-arroz/>
- Universidad Centroamericana José Simeon Cañas. (s.f.a). *Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino*. Consultado el 18 de agosto del 2022. <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/Densidad%20gravedad%20especifica%20y%20absorcion%20de%20agregados%20finos.pdf>
- Universidad Centroamericana José Simeon Cañas. (s.f.b). *Determinación de la consistencia normal del cemento Portland*. <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoCemento/CONSISTENCIA%20NORMAL%20DEL%20CEMENTO%20PORTLAND.pdf>
- Universidad Centroamericana José Simeon Cañas. (s.f.c). *Determinación de la expansión en autoclave del cemento Portland*. <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoCemento/Determinacion%20de%20la%20expansion%20en%20autoclave%20del%20cemento.pdf>
- Utest. (s.f.). *Mesa de Fluidéz para Cemento*. Consultado el 18 de agosto del 2022. <https://www.utest.com.tr/es/25876/Mesa-de-Fluidéz-para-Cemento>
- Vera León, M. (2008). *Escoria 1*. <https://www.flickr.com/photos/miguelvera-leon/2639419154>
- Vidaud, E. (2013, 23 de octubre). *Ensayo a la compresión: Medida del desempeño real del concreto*. Construcción y tecnología en concreto. <http://www.revistacyt.com.mx/index.php/ingenieria/19-ensayo-a-la-compresion-medida-del-desempeno-real-del-concreto>
- Vilcatoma Vásquez, J. A. (2019). *Diseño de un sistema de control basado en Labview para el diagnóstico en los motores eléctricos en el proceso de producción de cemento*.
- Yam, J. L. C., Carcaño, R. S. y Moreno, É. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7(2), 39–46.

# CONTROL TÉCNICO PARA MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO

Este trabajo abarca los conocimientos necesarios para realizar un control en las mezclas de concreto que se van a usar en determinado proyecto constructivo con las especificaciones iniciales que pueden ser modificadas para conseguir el diseño más óptimo necesario.

En su contenido encontrará una amplia explicación de las propiedades, resistencia y humedad de los cementantes y agregados, además de métodos para el diseño de mezclas juntos con los parámetros para realizar correcciones.

Dirigido principalmente a estudiantes de Ingeniería Civil y Tecnólogos en Obras Civiles, además de resultar útil para profesionales que están interesados en complementar sus conocimientos y como material de apoyo para los docentes que impartan materias relacionados a este tema.

## Incluye

- ▶ Explicación detallada de los cementantes y agregados, y explicaciones de fácil comprensión para los lectores en torno el diseño de mezclas de concreto por medio de dos métodos.
- ▶ Material visual de calidad que complementa las definiciones y conceptos.

### Javier Alfonso Cárdenas Gutiérrez

Estudiante de doctorado en Proyectos (UNINI), magíster en Administración de Empresas con especialidad en Dirección de Proyectos y especialista en Alta Gerencia. Ingeniero Civil. Director del programa académico de Ingeniería Civil de la UFPS y jefe del Departamento de Construcciones Civiles, Vías, Transporte, Hidráulica y Fluidos. Docente tiempo completo de la UFPS, director del grupo de investigación GITOC, investigador con categoría Senior según MinCiencias, Categoría B.

### Nelson Javier Cely Calixto

Doctor en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, magíster en Obras Hidráulicas, especialista en Agua y Saneamiento Ambiental e Ingeniero Civil. Docente tiempo completo UFPS. Investigador Junior del grupo de investigación Hydros. Consultor con experiencia de más de 15 años en proyectos de ingeniería hidráulica y sanitaria.

### Laura Elena Martínez Celis

Estudiante de sexto semestre de Ingeniería Civil, técnica en Asistencia Administrativa.



Universidad Francisco  
de Paula Santander

Vigilada Mineducación



e-ISBN 978-958-503-440-2