

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES DEL DISEÑO DE MEZCLAS

Método para seleccionar las proporciones del concreto

Aspectos generales del diseño de mezclas

El diseño de mezclas es el proceso de selección de los materiales y sus proporciones para la producción del concreto según los requerimientos de resistencia, costos, peso, durabilidad y apariencia de acabados.

En cuanto a cantidades y proporciones, ASOCRETO (2011) afirma que el cemento ocupa entre un 7% y 15% del volumen de la mezcla, proveyendo eficientemente propiedades de adherencia y cohesión; asimismo, los agregados, esencialmente grava y arena, ocupan entre el 59% y 76% del volumen. El agua, necesaria para la hidratación del cemento ocupa entre el 14% y 18% del volumen; y, por último, el aire atrapado en las mezclas varía entre el 1% y 3%.

El Instituto Americano del Concreto, ACI por sus siglas en inglés, a través de la norma ACI 211.1 describe dos métodos para seleccionar y ajustar las proporciones para concreto de peso y masa normal. El primer método se basa en un peso estimado de concreto por unidad de volumen; el segundo se basa en los cálculos de volumen absoluto ocupado por los componentes del concreto. Los procedimientos consideran requisitos como manejabilidad, consistencia, resistencia y durabilidad.

Requisitos para mezclas de concretos

Manejabilidad

La manejabilidad del concreto abarca rasgos de trabajabilidad y consistencia; la trabajabilidad es la capacidad del concreto de ser colocado y consolidado correctamente sin segregación superficial, teniendo en cuenta conceptos como capacidad de moldeo, cohesión y compactabilidad.

La manejabilidad está determinada por: granulometría, forma de las partículas y las proporciones de agregado; la presencia de aire y aditivos químicos; y la consistencia de la mezcla.

Consistencia

Definida como la movilidad relativa de la mezcla de concreto, la cual se mide en términos de asentamiento, se relaciona con la trabajabilidad. Un asentamiento dado depende del requerimiento de agua, que aumenta a medida que los agregados son más angulares y rugosos, y disminuye con el máximo tamaño de agregados bien gradados.

Resistencia

Aunque la resistencia es una importante característica del concreto, otras características como la durabilidad, permeabilidad y resistencia al desgaste son igual de importantes. La resistencia, a la edad de 28 días, es tomada con frecuencia como un parámetro de diseño estructural, dosificación y evaluación del concreto.

Relación agua-cemento

Se define como a/c y para un determinado conjunto de materiales y condiciones, la resistencia del concreto es determinada por la cantidad neta de agua usada por cantidad de cemento; esta no toma en cuenta la absorción de los agregados.

Las diferencias para una determinada relación a/c resultan del tamaño del agregado, gradación, textura, forma, resistencia y rigidez de las partículas; diferencias en los tipos de cemento y fuentes; contenido de aire y aditivos que afecten el proceso de hidratación.

Durabilidad

El concreto debe ser capaz de soportar las condiciones de exposición a las que esté sometido (congelamiento, deshielo, calentamiento y otros agentes de su entorno).

Densidad

Para ciertas aplicaciones, el concreto puede ser usado por sus características de peso.

Datos base para el diseño de mezclas

En lo posible, las selecciones de proporciones de concreto se deben basar en datos de las experiencias con los materiales a utilizar en mezclas, pero cuando la información sea muy poca o no exista, la ACI 211.1 es una guía que puede ser utilizada. La información necesaria de los materiales disponibles puede ser:

- Análisis granulométricos de los agregados.
- Peso unitario del agregado grueso.
- Densidad aparente y absorción de los agregados.
- Requerimientos agua-mezcla en base a los agregados.
- Relaciones a/c.
- Densidad de materiales cementantes.
- Combinaciones óptimas de agregados para satisfacer la densidad del concreto.

Procedimientos para el diseño de mezclas

A través de la guía ACI 211.1, el Instituto Americano del Concreto establece una serie de pasos lógicos y directos para diseñar mezclas de concreto, con especificaciones que abarcan variables como la relación a/c, mínimo contenido de cemento, contenido de aire, asentamiento, máximo tamaño del agregado, resistencia y otras propiedades relacionadas con el material cementante, aditivos y agregados. Estos pasos se enuncian a continuación:

Paso 1. Selección de asentamiento

Si el asentamiento no es especificado, un valor apropiado puede ser seleccionado a partir de la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Asentamientos recomendados para varios tipos de construcción.

Tipos de construcción	Asentamiento (mm)	
	Máximo	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzados	75	25
Zapatas, cajones y muros de subestructura sin refuerzo	75	25
Muros y vigas reforzados	100	25
Columnas	100	25
Pavimentos y losas	75	25
Concreto en masa	50	25

Fuente: Adaptado de ACI (2002).

Paso 2. Selección del tamaño máximo del agregado

Los grandes tamaños máximos nominales de un agregado bien graduado, tienen menos vacíos que los tamaños más pequeños, en efecto requieren menos cantidad de mortero por unidad de volumen. Por otra parte, mejores resultados se pueden obtener con la reducción de los tamaños nominales máximos para producir altas resistencias con una relación a/c dada. Esta selección se relaciona con el paso 3, en la cual se hace la estimación del contenido de agua y aire de la mezcla, acorde con el tamaño del agregado, como es explicado en la siguiente sección.

Paso 3. Estimación de contenido de agua y aire en la mezcla

La cantidad de agua por unidad de volumen requerida, para un asentamiento dado, depende del tamaño nominal máximo, forma y gradación de los agregados principalmente.

La tabla 2.2 muestra la cantidad de agua estimada para mezclas de varios tamaños máximos de agregados sin aire contenido en la mezcla.

Tabla 2.2 Cantidad de agua aproximada y presencia de aire para diferentes asentamientos dados.

Agua en l/m ³ para el tamaño nominal máximo indicado								
Asentamiento (mm)	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
Concreto sin entrada de aire								
25 a 50	208,1	199,2	187,3	178,4	163,5	154,6	130,8	113,0
75 a 100	228,9	217,0	202,2	193,2	178,4	169,5	145,7	124,9
150 a 175	243,8	229,0	214,1	202,2	187,3	178,4	160,5	-
Más de 175	-	-	-	-	-	-	-	-
Cantidad aproximada de aire en mezcla (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

Fuente: Adaptado de ACI (2002).

Paso 4. Selección de la relación a/c

La selección de la relación a/c no solo está determinada por requisitos de resistencia, sino también de durabilidad. La tabla 2.3 muestra las relaciones típicas de acuerdo a los requisitos de resistencia (estimada a edad de 28 días) usando cemento Portland Tipo I, y su comparación con la propuesta por Asocreto (2011).

Tabla 2.3 Relación entre a/c y resistencia a la compresión a los 28 días de edad de curado.

Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)	Relación a/c (ACI)	Relación a/c (ASOCRETO)
42	0,41	-
35	0,48	0,40
28	0,57	0,47
21	0,68	0,57
14	0,82	0,72

Para condiciones de exposición severa, la relación a/c debe mantenerse baja a pesar de que, según los requisitos de resistencia, podrían darse con una relación a/c más alta, tal como se indica en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Máxima relación a/c permitida para concretos con exposición severa.

Tipo de estructura	Estructura continuamente o frecuentemente expuesta al hielo y deshielo	Estructura expuesta al agua de mar o sulfatos
Secciones delgadas (postes, cunetas, botaguas, trabajos ornamentales), recubrimientos menores de 25 mm	0,45	0,40
Toda otra estructura	0,50	0,45

Fuente: Adaptado de ACI (2002).

Los valores que no están en la tabla 2.3 se pueden aproximar, mediante la ecuación 2.1.

$$\frac{f'_{cm\acute{a}x} - f'_{ci}}{a/c_{m\acute{a}x} - a/c_i} = \frac{f'_{cm\acute{a}x} - f'_{m\acute{i}n}}{a/c_{m\acute{a}x} - a/c_{i_{m\acute{i}n}}} \quad (2.1)$$

Donde:

a/c_i relación a hallar.

$a/c_{máx}$ relación extremo superior.

$a/c_{mín}$ relación extremo inferior.

f'_{ci} valor de resistencia a hallar (MPa).

$f'_{cmáx}$ valor de resistencia extremo superior (MPa).

$f'_{cmín}$ valor de resistencia extremo inferior (MPa).

Paso 5. Cálculo del contenido de cemento

La cantidad de cemento se calcula dividiendo el contenido de agua estimado por la relación a/c mediante la ecuación 2.2.

$$C = \frac{a}{a/C} \quad (2.2)$$

Donde:

a : cantidad de agua por unidad de volumen estimada (Kg/m^3).

C : cantidad de cemento por unidad de volumen (Kg/m^3).

a/C : relación agua-cemento seleccionada.

Paso 6. Estimación del contenido de agregado grueso

Agregados de similar tamaño nominal máximo y graduación producen concretos de manejabilidad satisfactoria, que también depende del tamaño nominal máximo y el módulo de finura; en la tabla 2.5 se indica el volumen de agregado grueso por unidad de volumen para concreto.

Tabla 2.5 Volumen de agregado grueso compactado por unidad de volumen de concreto.

Tamaño nominal máximo del agregado (mm)	Volumen de agregado grueso compactado por unidad de volumen para concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
19	0,66	0,64	0,62	0,59
25	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: Adaptado de ACI (2002).

Paso 7. Estimación del contenido de agregado fino

La cantidad de agregado fino es estimada por la diferencia entre el peso del concreto fresco y el peso total de los otros materiales, bien sea por el método de peso o el volumen absoluto.

Método del peso

Comúnmente, el peso del concreto es conocido con una exactitud razonable debido al conocimiento previo de los materiales; sin embargo, en ausencia de dicha información, la tabla 2.6 puede ser usada para dar una estimación.

Tabla 2.6 Primera estimación del peso de concreto fresco.

Tamaño nominal máximo del agregado (mm)	Primera estimación del peso del concreto (Kg/m ³)
	Sin entrada de aire
9,5	2.283
12,5	2.312
19	2.354
25	2.384
37,5	2.419
50	2.449
75	2.497
150	2.532

Fuente: Adaptado de ACI (2002).

Por otra parte, si teóricamente se requiere una estimación del peso por unidad de volumen, este se puede calcular con la ecuación 2.3.

$$U = 10xG_A x(100 - A) + Cx = \left(1 - \frac{G_A}{G_C}\right) + Wx(G_A - 1) \quad (2.3)$$

Donde:

A : porcentaje de contenido de aire.

C : cemento requerido en la mezcla (Kg/m^3).

G_A : gravedad específica media ponderada de agregado grueso y fino combinado.

G_C : gravedad específica del cemento (comúnmente 3,15).

U : peso del concreto fresco por m^3 (Kg).

W : agua requerida en la mezcla (Kg/m^3).

Método del volumen absoluto

Un procedimiento con más exactitud para calcular la cantidad de agregado fino implica el conocimiento del volumen desplazado por los materiales ya conocidos en la mezcla, que se restan de la unidad de volumen del concreto. El volumen ocupado en el concreto se calcula mediante la ecuación 2.4.

$$V = \frac{W}{D} \quad (2.4)$$

Donde:

D : densidad del material (Kg/m^3).

V : volumen ocupado por el material (m^3).

W : cantidad de agregado grueso requerido para la mezcla por unidad de volumen (Kg).

Para el cálculo del volumen de aire en la mezcla (si es considerado), se utiliza la ecuación 2.5.

$$V_v = \%AxU \quad (2.5)$$

Donde:

$\%A$: porcentaje teórico de aire en la mezcla.

U : unidad de volumen de la mezcla (m^3).

V_v : volumen teórico de aire en la mezcla (m^3).

Paso 8. Ajustes por humedad de los agregados

La cantidad de agua en la mezcla debe ajustarse a una cantidad equivalente a la absorción del agregado, esto varía de acuerdo a la humedad natural del agregado y se calcula mediante la ecuación 2.6.

$$W_M = W_D - G \times (A_G - H_G) - F \times (A_F - H_F) \quad (2.6)$$

Donde:

A_F : % de absorción del agregado fino.

A_G : % de absorción natural del agregado grueso.

F : cantidad de agregado fino requerido para la mezcla por unidad de volumen (Kg).

G : cantidad de agregado grueso requerido para la mezcla por unidad de volumen (Kg).

H_F : % de humedad natural del agregado fino.

H_G : % de humedad natural del agregado grueso.

W_D : cantidad de agua estimada para un asentamiento dado (Kg).

W_M : cantidad de agua requerida para la mezcla por unidad de volumen (Kg).

Paso 9. Ajustes en la mezcla de prueba

Se pueden realizar ajustes por el no cumplimiento de asentamientos u otros factores estimados para la mezcla, partiendo de la cantidad de agua, contenido de aire, relación a/c .

Una herramienta de utilidad puede ser la tabla 2.7 propuesta por VIDELA (2000). Ofrece valores de adición o sustracción de agua para modificar los valores de asentamiento en mezclas frescas de concreto.

Tabla 2.7 Ajuste de agua en litros para modificación de asentamiento.

		Asentamiento obtenido (mm)																												
		65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150											
0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
5	0	-10	-16	-20	-23	-26	-29	-30	-32	-33	-35	-36	-37	-38	-39	-40	-41	-42	-42	-43	-44	-44	-45	-46	-46	-47	-48	-48	-49	-49
10	10	0	-6	-10	-13	-16	-18	-20	-22	-23	-25	-28	-27	-28	-29	-30	-31	-32	-32	-33	-34	-35	-35	-36	-36	-37	-38	-38	-39	-39
15	16	6	0	-4	-5	-10	-12	-14	-16	-18	-19	-20	-21	-22	-23	-24	-25	-26	-27	-28	-29	-29	-30	-31	-31	-32	-32	-33	-33	
20	20	10	4	0	-3	-5	-8	-10	-12	-13	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21	-22	-23	-23	-24	-25	-25	-26	-26	-27	-28	-28	-29	-29
25	23	13	8	3	0	-2	-5	-7	-9	-10	-11	-13	-14	-15	-16	-15	-18	-19	-19	-20	-21	-21	-22	-23	-23	-24	-24	-25	-25	-26
30	26	16	10	5	2	0	-3	-5	-7	-8	-10	-11	-12	-13	-14	-12	-16	-17	-18	-18	-19	-20	-20	-21	-22	-22	-23	-23	-24	-24
35	28	18	12	8	5	3	0	-2	-4	-5	-7	-8	-9	-10	-11	-10	-13	-14	-15	-15	-16	-17	-17	-18	-18	-19	-20	-20	-21	-21
40	30	20	14	10	7	5	2	0	-2	-3	-5	-6	-7	-8	-9	-8	-11	-12	-13	-14	-15	-15	-16	-16	-17	-18	-18	-19	-19	
45	32	22	16	12	9	7	4	2	0	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-9	-10	-11	-12	-12	-13	-14	-15	-15	-16	-16	-17	-17	-17	
50	33	23	18	13	10	8	5	3	2	0	-1	-3	-4	-5	-6	-5	-8	-9	-9	-10	-11	-11	-12	-13	-14	-14	-15	-15	-15	
55	35	25	19	15	11	10	7	5	3	1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-6	-7	-8	-9	-9	-10	-11	-12	-13	-13	-14	-14	-14	
60	36	26	20	16	13	11	8	6	4	3	1	0	-1	-2	-3	-3	-5	-6	-7	-7	-8	-9	-9	-10	-11	-12	-13	-13	-14	
65	37	27	21	17	14	12	9	7	5	4	2	1	0	-1	-2	-2	-4	-5	-6	-6	-7	-8	-8	-9	-10	-11	-12	-12	-12	
70	38	28	22	18	15	13	10	8	6	5	3	2	1	0	-1	-3	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-8	-9	-9	-10	-10	-11	-11	
75	39	29	23	19	16	14	11	9	7	6	4	3	2	1	0	1	-2	-3	-3	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-8	-8	-9	-9	
80	40	30	24	20	17	15	12	10	8	7	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-3	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-8	-8	-9	-9
85	41	31	25	21	18	16	13	11	9	8	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-8	-8
90	42	32	26	22	19	17	14	12	10	9	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-6	-7
95	42	32	27	23	19	18	15	13	11	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-6
100	43	33	28	23	20	18	15	13	12	10	9	7	6	5	4	3	2	2	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-5	-6
105	44	34	28	24	21	19	16	14	12	11	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-5	-5
110	45	35	29	25	21	20	17	15	13	11	10	9	8	7	5	4	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-5	-5
115	45	35	29	25	22	20	17	15	13	12	11	9	8	7	6	5	4	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-4
120	46	36	30	26	23	21	18	16	14	13	11	10	9	8	7	6	5	4	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3
125	46	36	31	26	23	22	18	16	15	13	12	11	10	9	7	6	5	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3
130	47	37	31	27	24	22	19	17	15	14	12	11	10	9	8	7	6	5	4	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2
135	48	38	32	28	24	23	20	18	16	14	13	12	11	10	8	7	6	5	4	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2
140	48	38	32	28	25	23	20	18	16	15	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-1
145	49	39	33	29	25	24	21	19	17	15	14	13	12	11	9	8	7	6	5	4	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-1
150	49	39	33	29	26	24	21	19	17	16	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	5	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1

Fuente: Videla (2000) Dosificación de Hormigones.