

1. CEMENTOS

El cemento según la NCh148Of68 “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales”, es un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire.

Los cementos están compuestos por:

CLÍNQUER + YESO + ADICIONES

- Clínquer: es un producto formado esencialmente por silicatos de calcio hidráulicos que se obtienen por calcinación hasta fusión incipiente de una mezcla íntima y adecuadamente dosificada de materiales arcillosos y calcáreos.
- Yeso: se adiciona en cantidades pequeñas para regularizar el tiempo de fraguado.
- Adiciones: fundamentalmente puzolanas y escorias.
 - Puzolana: es un material silíceo – aluminoso que aunque no posee propiedades aglomerantes por sí solo, las desarrolla cuando está finamente dividido y en presencia de agua, por reacción química con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente.
 - Escoria granulada de alto horno: es el producto que se obtiene por enfriamiento brusco de la masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento de mineral de hierro de alto horno.

1.1 CEMENTOS PORTLAND

Según la NCh148 el cemento portland es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer y yeso y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3% en peso del cemento.

Los cementos portland son de composición variable, pero comprendida entre ciertos límites:

Tabla N°1. Composición química

Elemento	Contenido (%)
CaO	60-70
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0,5-6
MgO	0,1-4,0
SO ₃	1-3
Alcalís	0,2-1,3
Perdida por calcinación	0,6-2
Residuo insoluble	0,008-0,02

Estos óxidos que da el análisis químico no se hallan libres, si no combinados en virtud de las reacciones producidas en la fabricación. Los cuatro óxidos principales, CaO; SiO₂; Al₂O₃; Fe₂O₃, forman los compuestos:

- C_3S : Silicato tricalcico.
- C_2S : Silicato dicalcico.
- C_3A : Aluminato tricalcico.
- C_4AF : Ferroaluminato tetracalcico.

Estos compuestos se encuentran en distintas cantidades, definiéndose de esta forma distintos tipos de cementos. En la tabla N° 2 se encuentran las propiedades de estos compuestos y la tabla N° 3 se encuentra la s cantidades medias de la clasificación de los cementos portland usada en E.E.U.U.

Tabla N°2. Propiedades de los compuestos principal es

Parámetro	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Velocidad de reacción	Media	Lenta	Rápida	Lenta
Calor liberado	Medio	Poco	Mucho	Poco
Valor aglomerante Inicial	Bueno	Pobre	Bueno	Pobre
Final	Bueno	Bueno	Pobre	Pobre
Reacción con sulfato	No	No	Sí	No

Tabla N°3.Composiciones medias de cementos Portland según clasificación ASTM

Componente	I Corriente	II Moderado calor	III Alta resistencia inicial	IV Bajo calor	V Resistente a los sulfatos
C_3S	48	43	57	20	39
C_2S	28	30	20	52	33
C_3A	12	7,5	11	6	4,5
C_4AF	8	12	7	14	16

En cuanto a los otros óxidos:

- El MgO , SO_3 , y cal libre pueden producir expansiones diferidas que al ocurrir en el hormigón endurecido ocasionan su agrietamiento. Por tal razón se limita en las normas su contenido máximo y además se hace con el cemento un ensayo acelerado de expansión.
- El álcalis ($NaO + 0,658K_2O$), tiene gran trascendencia en el comportamiento del hormigón, ya que reacciona con ciertos áridos produciendo expansiones y grietas en el hormigón.
- La Perdida por calcinación es la disminución relativa de peso del cemento al calentarlo a 1000 °C. En este calentamiento se desprenden principalmente agua y hidróxido de carbono. El H_2O proviene de varios orígenes: en primer lugar de que en las fábricas se rocía el clínker con agua para enfriarlo, lo que produce una pequeña hidratación superficial; en segundo lugar, de la humedad del aire absorbida por el mismo clínker; en tercer lugar, del agua que lleva el yeso, ya que este no pasa por el horno de fabricación. El CO_2 proviene de la absorción del aire.
- El residuo Insoluble se refiere a la parte del cemento que se disuelve en ácido clorhídrico. Es un índice para saber si la clinquerización ha sido, o no, completa, o sea, es un índice de que el proceso de fabricación ha sido bien efectuado.

1.2 CEMENTOS PUZOLÁNICOS

De acuerdo a la norma NCh148, cemento puzolánico es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer, puzolana y yeso y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3 % en peso del cemento.

La puzolana además de incorporarse en la molienda conjunta del clínquer y yeso, se puede incorporar como adición en el hormigón en la misma obra.

En Chile de acuerdo a la dosis de puzolana que tenga el cemento se tienen 2 tipos de cementos:

- Portland puzolánico tiene menos de un 30 % de puzolana.
- Puzolánico tiene más de un 30 % y menos de un 50 % de puzolana.

Los cementos con puzolanas tienen como características:

- Poseen resistencia química en especial a los sulfatos.
- Le da mayor impermeabilidad al hormigón.
- Baja el calor de hidratación liberado por el cemento.
- Son cementos en general más lentos que los portland.
- Inhiben la reacción álcali árido.

La puzolana en Chile para poder utilizarse debe cumplir la norma *NCh161.Eof69 Cemento - Puzolana para uso en cementos – Especificaciones*.

1.3 CEMENTOS SIDERÚRGICOS

De acuerdo a la norma NCh148, cemento siderúrgico es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer, escoria de alto horno y yeso y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3 % en peso del cemento.

En Chile de acuerdo a la dosis de escoria que tenga el cemento se tienen 2 tipos de cementos:

- Portland siderúrgico tiene menos de un 30 % de puzolana.
- Siderúrgico tiene más de un 30 % y menos de un 75 % de escoria.

Los cementos con siderúrgicos tienen como características:

- Poseen resistencia química en especial a los sulfatos.
- Le da mayor impermeabilidad al hormigón.
- Baja el calor de hidratación liberado por el cemento.
- Son cementos en general más lentos que los portland.
- Inhiben la reacción álcali árido.

1.4 HIDRATACIÓN DEL CEMENTO

Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. Durante esta reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con agua para formar una pasta de aspecto similar a una roca. Cuando la pasta (cemento + agua) se agrega a los agregados actúa como adhesivo y une a todas las partículas de agregado para formar así el hormigón.

La hidratación comienza tan pronto como el cemento entra en contacto con el agua. Cada partícula de cemento tiene un aumento sobre su superficie, y gradualmente se extiende hasta enlazarse con el aumento de otras partículas de cemento o hasta que adhiere a las sustancias adyacentes. Esta reconstitución tiene como resultado la progresiva rigidización, endurecimiento y desarrollo de resistencia.

La hidratación prosigue mientras se disponga de espacio para los productos de la hidratación y se tengan condiciones favorables de humedad y temperatura (curado). A medida que la hidratación continua, el hormigón se vuelve más duro y más resistente.

1.5 PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS

Las especificaciones de cementos limitan su composición química (vistas en el punto 1.1) y sus propiedades físicas, es por ello el conocimiento de las propiedades más importantes.

1.5.1 Peso específico

- El cemento portland tiene un peso específico de 3,12 a 3,16.
- No es un indicador de calidad del cemento; su uso principalmente se tiene en los cálculos de dosificaciones.
- Las adiciones que se añaden al clínquer, sea puzolana o escoria tienen un peso específico menor que el clínquer por eso los cementos con adición tienen un peso específico menores que los portland y tanto menores cuanto mayor es la proporción de adición añadida.

Por ejemplo:

Polpaico especial que tiene como un 30% de puzolana tiene un p.e de 2,85.

Polpaico 400 que tiene como un 18 % de puzolana tiene un p.e de 2,95.

1.5.2 Finura

- Como las reacciones de hidratación se producen en la superficie de los granos, sucede que cuanto más pequeño son éstos, es más rápido el desarrollo de resistencia. Así un cemento de alta resistencia inicial puede obtenerse sin más que moler más fino el mismo clínquer de un cemento corriente. Ese aumento de resistencia es notables a edades tempranas y a lo largo del tiempo se igualan.
- El calor de hidratación se desarrolla más rápido en los cementos más finos.
- La mayor finura le confiere mayor trabajabilidad al hormigón a igualdad de dosis de agua.

1.5.3 Consistencia

- La consistencia se refiere a la movilidad relativa de una pasta de cemento o mortero recién mezclado o bien su capacidad de fluir.

- Se define la consistencia normal según la NCh, como sigue: la pasta tendrá una consistencia normal, cuando la sonda se detiene a 6 ± 1 mm sobre el fondo del molde, 30 s después, de soltarla.

1.5.4 Fraguado

- El fraguado es el fenómeno en virtud del cual la pasta de cemento deja de ser plástica y adquiere una rigidez tal que ya no admite moldearse. Interesa medir el tiempo de fraguado o sea lo que demora la pasta en fraguar desde el momento en que el cemento se mezcla con el agua.
- Como en el tiempo de fraguado influye la temperatura, la humedad del ambiente y la cantidad de agua de la pasta, quedan fijados en la norma estas condiciones.
- Se prepara una pasta a consistencia normal, se penetra esta pasta con la aguja de vicat. La aguja al principio penetra hasta el fondo y después penetra cada vez menos. El momento que la punta de la aguja queda a 3 mm del fondo es el principio de fraguado y cuando la aguja ya no penetra en la superficie es el fin de fraguado.

1.5.5 Falso fraguado

- Es un endurecimiento prematuro inicial de la pasta o del hormigón que se presenta entre 1 a 5 minutos después del mezclado.
- Si hay evidencia de fraguado errático o rigidez rápida temprana se produce:
 - Una demanda mayor de agua.
 - Incremento de agrietamiento.
 - Bajas en la resistencia.

1.5.6 Resistencias mecánicas

- Para determinar la resistencia de un cemento, se ensaya un mortero confeccionado con él. Pero como la resistencia de ese mortero depende de muchos factores, es necesario fijar todos ellos. Lo que hacen es definir el tipo de arena, granulometría, proporción cemento/arena, relación agua/cemento, modo de revoltura, temperatura de confección, compactación, tipo de probeta, método de conservación (curado) y edades de ensayo. En esas condiciones se especifican las resistencias mínimas que deben cumplir los cementos.
- En Chile se tiene:
 - Arena de San Sebastian con una banda especificada.
 - Cemento/arena = 1/3 en peso.
 - Agua/cemento = 0,5.
- Así, para cada ensayo, se mezclan 500 g de cemento, 1500 g de arena y 250 g de agua, con cuya mezcla preparada en una revolvedora normal, se llenan 3 probetas prismáticas de 40x40x160 mm. Se ensaya a flexión con una luz de 100 mm y luego se ensayan los cubos modificados a compresión.

1.5.7 Calor de hidratación

- El calor de hidratación, es el calor que se genera cuando reaccionan el agua y el cemento.

- La cantidad de calor generado depende principalmente de la composición química del cemento, siendo el C_3A y C_2S los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo de calor.
- Otros factores que también influyen son: (incrementos en estos factores aumentan el calor de hidratación)
 - A/C.
 - Finura.
 - Temperatura de curado.
- En ciertas estructuras, como ocurre con aquellas de masa considerable, la velocidad así como la cantidad de calor generado son de gran importancia. Si este calor no se disipa rápidamente, puede ocurrir un aumento considerable en la temperatura del hormigón. Esto puede ser indeseable puesto que, después de endurecimiento a una elevada temperatura, el enfriado no uniforme en el hormigón hasta alcanzar la temperatura ambiente, puede crear esfuerzos indeseables debidos a contracción térmica y a condiciones de restricción.

1.6 REQUISITOS DE LA NORMA NCh148

En Chile los cementos se definen por su clase y grado.

De acuerdo a sus clases se tiene:

- Cemento portland: es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer y yeso, con adición de hasta un 3 % de materias extrañas.
- Cemento siderúrgico:
 - Cemento portland siderúrgico: es el cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado.
 - Cemento siderúrgico: es el cemento en cuya composición entrará escoria básica granulada de alto horno en una proporción comprendida entre el 30% y el 75% en peso del producto terminado.
- Cemento con agregado tipo A:
 - Cemento portland con agregado tipo A: es el cemento en cuya composición entrará agregado tipo A en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado.
 - Cemento con agregado tipo A: es el cemento en cuya composición entrará agregado tipo A en una proporción comprendida entre el 30% y el 50% en peso del producto terminado.
- Cemento puzolánico:
 - Cemento portland puzolánico: es el cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado.

- Cemento puzolánico: es el cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción comprendida entre el 30% y el 50% en peso del producto terminado.
- Cemento con fines especiales: es el cemento en cuya composición entraran los productos que se emplean normalmente en la fabricación de cementos, cuyos requisitos y propiedades se establecen por acuerdo previo entre productor y consumidor para cumplir determinados fines.

Los cementos de cada una de las clases indicadas se clasifican de acuerdo a su resistencia, en 2 grados:

- Cemento corriente.
- Cemento de alta resistencia.

Los requisitos que se tienen para cada clase y grado se indican en las tablas N° 4 y 5.

Tabla N° 4. Requisitos químicos para los cementos

	Cemento Portland	Cementos siderúrgicos		Cementos puzolánicos		Cementos con agregado tipo A	
		Portland siderúrgico	Siderúrgico	Portland puzolánico	Puzolánico	Portland con agregado tipo A	Con agregado tipo A
Pérdida por calcinación máxima (%)	3,0	5,0	5,0	4,0	5,0	7,0	9,0
Residuo insoluble máximo (%)	1,5	3,0	4,0	30,0	50,0	21,0	35,0
Contenido de SO_3 máximo (%)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Contenido de MgO máximo (%)	5,0	—	—	—	—	—	—
Contenido de Mn_2O_3 máximo (%)	—	2,0	2,0	—	—	—	—

Tabla N°5. Requisitos físico mecánicos de los cementos

Grado	Tiempo de fraguado		Resistencia mínima a la compresión		Resistencia mínima a la flexión	
	Inicial mínimo (min)	Final máximo (h)	7 días kg/cm ²	28 días kg/cm ²	7 días kg/cm ²	28 días kg/cm ²
Corriente	60	12	180	250	35	45
Alta resistencia	45	10	250	350	45	55

Además de estos requisitos se debe cumplir:

- Los cementos portland deben tener un peso específico superior a 3,00.
- Todos los cementos deben tener una expansión en autoclave máxima de 1 %.

1.7 CONSERVACIÓN DEL CEMENTO

- En contacto con el aire húmedo, el cemento absorbe agua y anhídrido carbónico, que afectan a sus propiedades. Los efectos que se producen son:
 - Disminución de la resistencia sobre todo en las primeras edades.
 - Alteración en el tiempo de fraguado.
 - Aumento de la cantidad de agua.
- En obra debe tenerse especial cuidado en la conservación del cemento:
 - Mantener en bodegas muy bien aisladas de la humedad.
 - Los sacos o big bag no apoyados directamente en el suelo ni en las paredes.
 - Cada partida de cemento que llega a bodega debe quedar identificada marcada con su fecha de llegada, y la entrada a faena ha de ser por el mismo orden cronológico.
- En la práctica se nota que el cemento está deteriorado porque se forman grumos. Mientras estos grumos puedan deshacerse entre los dedos, se da el cemento por aceptado. En caso contrario, hay que tamizar el cemento, desechando los grumos endurecidos.

2. ÁRIDOS

Debido a que por lo menos $\frac{3}{4}$ partes del volumen del hormigón están ocupados por los áridos, no es de extrañar el hecho de que la calidad de los mismos sea de suma importancia. El árido no sólo limita la resistencia del hormigón, puesto que los áridos débiles no pueden constituir un hormigón resistente, si no que además sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento estructural del hormigón.

Los áridos deben cumplir ciertas restricciones para darles un adecuado uso en los hormigones: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimiento de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento y el árido. Las partículas de árido que sean desmenuzables o susceptibles de resquebrajarse son indeseables.

En Chile la norma que define los requisitos para los áridos que se utilizaran en hormigón es la *NCh163.Of79 áridos para morteros y hormigones – requisitos generales*.

Los áridos según su tamaño de sus partículas se clasifican:

- Arena (árido fino): árido que pasa por el tamiz de abertura nominal de 5 mm (malla N°4) y retenido en el de 0,080 mm (malla N°200) con las tolerancias establecidas en la NCh163.
- Grava (árido grueso): árido retenido en el tamiz de abertura nominal de 5 mm (malla N°4). Dentro de los áridos gruesos podemos hacer otra división:
 - Grava: retenido en tamiz $\frac{3}{4}$ ".
 - Gravilla: que pasa por el tamiz $\frac{3}{4}$ ".

2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS

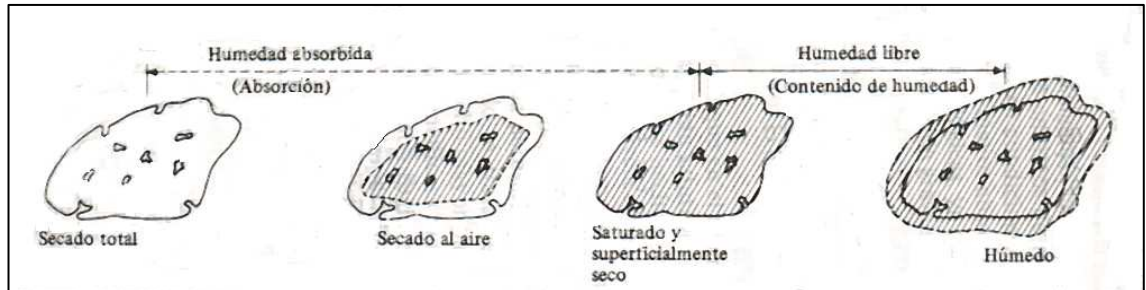
Las especificaciones de áridos limitan su composición química y sus propiedades físicas y mecánicas, es por ello el conocimiento de las propiedades más importantes.

2.1.1 Absorción y humedad superficial

- La absorción y humedad superficial de los áridos se determina de manera que se pueda controlar el contenido neto de agua en el hormigón y se puedan determinar los pesos correctos de cada mezcla.
- La estructura interna de una partícula de árido, esta constituida de materia sólida y de vacíos que pueden o no contener agua.
- Las condiciones de humedad característicos de los áridos se designan como:
 - Seco al horno – completamente absorbentes.
 - Secados al aire – secos en la superficie de la partícula pero conteniendo cierta humedad interior, siendo por lo tanto algo absorbentes.

- Saturados y superficialmente secos (sss) – no absorben ni ceden agua al hormigón.
- Húmedos – contienen exceso de humedad en la superficie (agua libre)

Figura N°1. Representación esquemática de la humedad de los áridos



- La cantidad de agua utilizada en la mezcla de hormigón, se debe ajustar a las condiciones de humedad de los áridos de manera que cubra los requerimientos de agua.
- Las respectivas condiciones de humedad definen los siguientes parámetros:

$$A = \text{absorción} = \frac{(P_{\text{sss}} - P_0)}{P_0} \times 100$$

$$H = \text{humedad total} = \frac{(P_H - P_0)}{P_0} \times 100$$

$$h = \text{humedad libre} = H - A$$

En que:

P_0 : peso de la muestra seca al horno.

P_{sss} : peso de la muestra de árido saturada superficialmente seca.

P_H : peso de la muestra húmeda.

Ejemplo

Se tiene la siguiente dosificación en peso para un m^3 de hormigón y calculada en base a áridos saturados con superficie seca

Cemento	320 kg
Grava	1300 kg
Arena	700 kg
Agua	170 lt

En el momento de aplicar la dosificación en la obra, los áridos se encuentran húmedos:

	Grava	Arena
Humedad (%)	2,0	4,0
Absorción (%)	1,0	2,0
h (%)	1,0	2,0

¿Cuál es la dosificación para los áridos húmedos?

Agua libre : grava : $1/100 \times 1300 = 13$ lt
arena : $2/100 \times 700 = 14$ lt

Cemento	320 kg
Grava	1313 kg
Arena	714 kg
Agua	$170 - 13 - 14 = 143$ lt

- Para áridos finos es muy importante considerar el **esponjamiento**, el cual es el aumento del volumen total del árido fino respecto al mismo peso seco. La tensión superficial del agua mantiene separadas las partículas, provocando un aumento del volumen. Este valor reviste especial importancia en la medición de las dosificaciones por volumen, pues al no considerarlo se obtienen medidas erróneas al medir una cantidad de árido fino menor a la real. El aumento de volumen de una arena, puede alcanzar al 20 % o 30 % del mismo árido en estado saturado superficialmente seco (sss).

2.1.2 Densidades

- La determinación de esta propiedad sirve para la determinación de cantidades en las dosificaciones.
- La densidad aparente se define como:
$$d.a = \frac{\text{Masa del material contenido en la medida}}{\text{Volumen de la medida}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Dependiendo del método de compactación es la densidad que se obtiene.
- Densidad aparente suelta es aquella que se obtiene llenando un recipiente dejando caer el material desde una altura aproximada de 5 cm sobre el borde de la medida y distribuyendo uniformemente el vaciado, se enrasa y se obtiene la masa.
- Densidad aparente compactada por apisonado es aquella que se obtiene llenando un recipiente en 3 capas, cada una compactada con 25 golpes.
- Densidad aparente compactada por persecución es aquella que se obtiene llenando la medida en 3 capas, cada una compactada levantando el recipiente alternativamente por sus asas opuestas a una altura aproximada de 5 cm y dejándola caer contra una base firme.
- La densidad neta y real sss es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión).

2.1.3 Resistencia al desgaste

- La resistencia al desgaste de un árido a menudo se emplea como un índice general de su calidad.

- La resistencia al desgaste es esencial cuando un árido se emplea para producir hormigones sujetos a abrasión, como ocurre en los pisos para servicio pesado o en los pavimentos.
- La prueba más común para determinar la resistencia al desgaste, es la prueba de los ángeles.

2.1.4 Resistencia a congelación y deshielo

- La resistencia de un árido a la congelación y deshielo, es una característica importante de un hormigón para exteriores, está relacionado con su porosidad, absorción, permeabilidad y estructura de poro.
- Una partícula de árido puede absorber tanta agua que no pueda acomodar la expansión y la presión hidráulica que ocurre durante el congelamiento del agua. Como resultado se tiene que la expansión misma del árido y la posible desintegración del hormigón, si han sido afectadas suficientes partículas.
- El comportamiento de los agregados expuestos a la congelación y deshielo se puede evaluar.
- Para evaluar esta propiedad existe la prueba directa de hielo y deshielo del hormigón.
- Además se evalúa indirectamente a través del ensayo del sulfato de sodio o magnesio. La prueba consiste en aplicar a una muestra de árido un cierto número de ciclos de inmersión en una solución de sulfatos, para crear una presión a través del crecimiento de cristales de sal en los poros del árido similar a la producida por el agua de congelación. Entonces la muestra se seca al horno y se calcula el porcentaje de pérdida de peso.
- Otro ensayo o manera de evaluar es a través de la limitación de la absorción de los áridos.

2.1.5 Materiales perjudiciales

- Impurezas orgánicas pueden retrasar el fraguado y el endurecimiento del hormigón, pueden reducir el aumento de resistencia y algún deterioro en el hormigón.
- Material fino menor que malla N° 200 en especial limos y arcillas, pueden estar presentes como polvo suelto y formar una capa alrededor de las partículas de árido, pudiendo debilitar la adherencia del árido con la pasta y aumentar el agua requerida de la mezcla.
- Carbón y lignito u otros materiales de peso ligero afectan la durabilidad del hormigón si están presente en cantidades excesivas.
- Partículas blandas no se admiten en el árido grueso porque pueden afectar la durabilidad y la resistencia a la abrasión del hormigón.
- Partículas desmenuzables estas partículas se podrían romper durante el mezclado y de ese modo aumentar la cantidad de agua requerida de la mezcla.

2.1.6 Reactividad álcali árido

- Existen áridos que reaccionan con los álcalis del cemento produciendo expansiones, agrietamientos los cuales son nocivos para la durabilidad del hormigón.

- Existen diversas pruebas que evalúan la reactividad del árido con los álcalis.

2.1.7 Sales solubles

- Los áridos contienen sales solubles tales como cloruros, sulfatos, sulfuros oxidables que en conjunto con los aportados por los otros componentes pueden afectar la durabilidad del hormigón.
- Es por eso que la norma NCh163 limita los contenidos para la mezcla de todos los componentes del hormigón.
- Los áridos con mayores problemas se encuentran en el norte del país.

2.1.8 Granulometría

- La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de áridos determinados por tamizado directo.
- Existen variadas razones por las que se especifica los límites granulométricos y el tamaño máximo de los áridos, dentro de los cuales se tienen:
 - Las proporciones relativas de los áridos.
 - Dosis de agua.
 - Dosis de cementos.
 - Trabajabilidad.
 - Capacidad de bombeo.
 - Porosidad.
 - Retracción.
- Los tamices especificados en la norma NCh163 son:

Tabla N°6. Denominación de tamices

NCh163 (mm)	ASTM (in)
80	3
63	2 1/2
50	2
40	1 1/2
25	1
20	3/4
12,5	1/2
10	3/8
5	N°4
2,5	8
1,25	16
0,630	30
0,315	50
0,160	100

- De acuerdo a la norma NCh163 se definen los siguientes términos para el tamaño máximo:
 - Tamaño máximo absoluto de un árido (Da) corresponde a la abertura del menor tamiz de la serie de tamices, que deja pasar el 100 % de la masa del árido.

- Tamaño máximo nominal de un árido (D_n) corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor que D_a , cuando por dicho tamiz pase el 90 % o más de la masa de un árido. Cuando pasa menos del 90 %, el tamaño máximo nominal se considerará igual al tamaño máximo absoluto.

Ejemplo

Tamiz, mm	% que pasa		
	Curva 1	Curva 2	Curva 3
63	100	100	100
50	93	90	82
40	90	82	78

Curva	D_n (mm)	D_a (mm)
1	50	63
2	50	63
3	63	63

2.1.9 Módulo de finura

- Como índice del grado de finura de los áridos se suele emplear con bastante frecuencia lo que conocemos como “módulo de finura MF”.
- A la serie de tamices normativos se les da una numeración especial que empieza con 1 para el más fino y sigue la secuencia de enteros naturales, tal como se indica en la tabla siguiente.

Tabla N°7. Serie de tamices para MF

Malla	#100	#50	#30	#16	#8	#4	3/8"	3/4"	1 1/2"
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9

$$MF = \frac{100n - \sum \% \text{ que pasan}}{100}$$

n: número de tamices considerados

Ejemplo

Tamiz	% que pasa		
	(1)	(2)	(3)
11/2"			100
1"			72
3/4"			55
1/2"			18
3/8"	100	100	3
N° 4	79,8	98,7	1
8	61,2	90,0	
16	45,8	50,6	
30	30,3	2,0	
50	17,8		
100	6,0		
100n	700	700	900
Σ	340,9	341,3	159
MF	3,6	3,6	7,4

En determinadas ocasiones se hace necesario realizar mezcla de áridos, estas se pueden efectuar a partir de módulos de finura, ajuste de curva granulométrica o por tanteos.

Ejemplo

Tamiz	grava	gravilla	NCh. Grava
2"	100		100
11/2"	98		90-100
1"	50		
3/4"	17	100	35-70
1/2"	2	58	
3/8"	1	36	10-30
4		8	0-5
8			
16			
30			
50			
100			
100n	116	144	170
Σ	900	800	900
MF	7,84	6,56	7,30

Dadas la grava y la gravilla existentes se pide ajustarse a la banda de grava de la norma NCh

$$7,84X_1 + 6,56X_2 = 7,30 (X_1 + X_2)$$

$$X_1 + X_2 = 1$$

$X_1 = 0,58$ o sea un 58 % y $X_2 = 0,42$ o sea un 42 %

2.2 REQUISITOS DE LA NORMA NCh163

Tabla N°7. Requisitos generales

Requisitos	Valores límites	
	Grava	Arena
1. Material fino menor que 0,080 mm (Nota 1):		
a) Para hormigón sometido a desgaste % máximo	0,5	3,0
b) Para todo otro hormigón % máximo	1,0	5,0
2. Impurezas orgánicas (Nota 2) referidas a color límite sin patrón.	—	Amarillo claro
3. Granulometría	Ver tabla 8	Ver tabla 9
4. Partículas desmenuzables % máximo	5,0	3,0
5. Partículas blandas % máximo	5,0	—
6. Cloruros como Cl^- (Notas 3 y 6) (kg/m^3 de hormigón):		
a) para hormigón armado *) máximo	1,20	
b) para hormigón pretensado máximo	0,25	
7. Sulfatos y sulfuros como SO_4^{2-} (Notas 4, 5 y 6)(kg/m^3 de hormigón):		
a) sulfatos solubles en agua máximo	0,60	
b) sulfuros oxidables máximo	1,80	
8. Carbón y lignito:		
a) para hormigón a la vista % máximo	0,5	0,5
b) para todo otro hormigón % máximo	1	1
9. Resistencia a la desintegración (pérdida de masa en 5 ciclos de inmersión y secado) (Nota 7):		
a) con sulfato de sodio % máximo	12	10
b) con sulfato de magnesio % máximo	18	15
10. Resistencia al desgaste. Máquina de los Ángeles:		
a) para hormigón sometido a desgaste % máximo	40	—
b) para todo otro hormigón % máximo	50	—
11. Absorción de agua (porosidad) (Nota 8) % máximo	2	3
12. Coeficiente volumétrico medio:		
a) árido de tamaño máximo absoluto mayor que 25 mm:		
- para hormigón simple mínimo	0,15	—
- para hormigón armado mínimo	0,20	—
b) árido de tamaño máximo absoluto menor que 25 mm:		
- para hormigón simple mínimo	0,12	—
- para hormigón armado mínimo	0,15	—

Notas

- 1) En el caso de áridos tratados por trituración, los límites se subirán a 1,0 % y a 1,5 % respectivamente en la grava y a 5 % a 7 % respectivamente en la arena. Cuando no se cumpla este requisito se debe decidir en base al ensayo de equivalente de arena, según NCh 1325, el cual debe entregar un valor mayor que 75 %, o bien se deben efectuar ensayos comparativos según NCh 1502.
- 2) El color límite está fijado por un color patrón. Cuando la mayor coloración se deba a la presencia de carbón o lignito que no excedan de los límites indicados en el requisito 7,

la arena podrá aceptarse si sometida al ensayo comparativo de la NCh 1502 se obtiene una resistencia relativa igual o mayor al 95 %.

- 3) Para cuantificar el contenido de cloruros se debe considerar el aporte proporcional de la arena y la grava en 1 m³ de hormigón elaborado. Cuando haya aporte de cloruros de los demás componentes del hormigón (agua de amasado, cemento, aditivos) los límites de la tabla se deben considerar también dichos aportes.
- 4) Para cuantificar el contenido de sulfatos y sulfuros oxidables se debe considerar el aporte proporcional de la arena y la grava en 1 m³ de hormigón. Cuando haya aportes de sulfatos y/o sulfuros de los demás componentes del hormigón (excluyendo el cemento) los límites de la tabla deben considerar también dichos aportes.
- 5) El límite de sulfuros está basado en el comportamiento de áridos de la zona central del país los cuales, con contenidos similares de sulfuros, no han presentado reacciones perniciosas en servicio.
- 6) Siempre que exista riesgo de corrosión de armaduras y/o desintegración del hormigón es necesario establecer en las especificaciones técnicas las precauciones necesarias para su protección (ver NCh 170, anexo H, Hormigones en ambientes agresivos). Al efecto, es recomendable asesorarse por entidades o personas especializadas en el tema.
- 7) El ensayo es optativo con cualquiera de ambas sales. En caso de incumplimiento se recomienda decidir en base a ensayo de congelación y deshielo sobre probetas de hormigón aceptando una pérdida de masa igual o menor al 25 % en 300 ciclos.
- 8) En caso de incumplimiento de este requisito se recomienda efectuar ensayos sobre mezclas de prueba. Para hormigones en zonas de clima severo se recomienda efectuar, además, ensayos de congelación y deshielo sobre probetas de hormigón aceptando una pérdida de masa igual o menor al 25 % en 300 ciclos.

Tabla N°8. Granulometría de la arena

Tamices, mm	% acumulado que pasa
10	100
5	95 – 100
2,5	80 – 100
1,25	50 – 85
0,630	25 – 60
0,315	10 – 30
0,160	2 - 10

Para evaluar el cumplimiento de la granulometría en el caso de las arenas cuyo tamaño máximo nominal exceda los 5 mm se debe efectuar una conversión de la granulometría original considerando como 100 % el material que pasa por el tamiz 5 mm de abertura nominal

Por ejemplo

Tamiz	% que pasa	% corregido
1/2"	100	
3/8"	94	
N° 4	85	100
8	80	94
16	68	80
30	29	34
50	4	5
100	2	2

Tabla N°9. Granulometría de la grava

Tamiz Mm	% acumulado que pasa para los siguientes grados (definidos por tamaños límites en mm)								
	63-40	50-25	50-5	40-20	40-5	25-5	20-5	12,5-5	10-2,5
80	100	-	*)	-	*)	-	-	-	-
63	90-100	100	100	-	-	-	-	-	-
50	35-70	90-100	90-100	100	100	-	-	-	-
40	0-15	33-70	-	90-100	90-100	100	-	-	-
25	-	0-15	35-70	20-55	-	90-100	100	-	-
20	0-5	-	-	0-15	35-70	-	90-100	100	-
12,5	-	0-5	10-30	-	-	25-60	-	90-100	100
10	-	-	-	0-5	10-30	-	20-55	40-70	90-100
5	-	-	0-5	-	0-5	0-10	0-10	0-15	10-30
2,5	-	-	-	-	-	0-5	0-5	0-5	0-10
1,25	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5

*) Los grados 50-5 mm y 40-5 mm corresponden a mezclas de los grados 50-25 mm con 25-5 mm y 40-20 mm con 20-5 mm, respectivamente.

Las arenas y gravas que no cumplan con los requisitos granulométricos pueden ser utilizados siempre que las mezclas de prueba preparados con estos áridos cumplan con los requisitos de las especificaciones particulares de las obras.

3. AGUA

Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga un sabor u olor pronunciado, se puede utilizar para producir hormigón. Sin embargo, algunas aguas no potables pueden ser adecuadas para el hormigón.

En Chile la norma que especifica los requisitos del agua es la NCh1498.Of82 "Hormigón – Agua de amasado – Requisitos", en la que se especifica:

- El agua potable de red puede emplearse como agua de amasado siempre que no se contamine antes de su uso.
- Se permite el empleo de agua de mar solamente en hormigones simples de resistencia característica a la compresión inferior a 15 Mpa siempre que no exista otra fuente disponible en la zona.
- No se permite el empleo de agua que contenga azúcares como sacarosa, glucosa o similares.
- Pueden emplearse aguas de otro origen o procedencia o cuya calidad se desconozca, siempre que cumplan con los requisitos químicos básicos indicados en la tabla siguiente:

Tabla N°10. Requisitos químicos básicos

Requisitos químicos	Unidad	Valores límites
Valor del pH ¹⁾	—	6 a 9,2
Sólidos en suspensión	mg/l	≤ 2000
Sólidos disueltos ²⁾	mg/l	≤ 15000
Materiales orgánicos (como oxígeno consumido)	mg/l	≤ 5

Notas

- 1) Se recomienda determinar el pH en el mismo lugar del muestreo o lo más pronto posible después de tomada la muestra.
- 2) El contenido de sólidos disueltos puede determinarse, aproximadamente, mediante el ensayo de conductancia eléctrica específica, expresada en milimho/cm, según la NCh 417 .

Si el contenido de sólidos disueltos resulta mayor que 5000 mg/l, las aguas deben cumplir además con los requisitos químicos complementarios que se indican en la tabla siguiente

Tabla N°11. Requisitos químicos complementarios

Requisitos químicos	Unidad	Valores máximos
Cloruros ¹⁾		
- En hormigón armado	KgCl/m ³ de hormigón	1,200
- En hormigón tensado	KgCl/ m ³ de hormigón	0,250
Sulfatos solubles en agua ²⁾	KgCl/ m ³ de hormigón	0,600
- en todo hormigón		

Notas

- 1) El contenido de cloruro en el hormigón corresponde al total aportado por los áridos, cemento, agua y aditivos.
- 2) El contenido de sulfatos solubles en el hormigón corresponde al total aportado por los áridos, agua y aditivos.

Los requisitos indicados en la tabla N° 10 y 11 son impurezas que afectan el hormigón en los siguientes aspectos:

- Tiempo de fraguado.
- Resistencia del hormigón.
- Se puede producir eflorescencia o manchado.
- Corrosión del acero.
- Inestabilidad volumétrica.
- Menor durabilidad.

4. ADITIVOS

Los aditivos son aquellos ingredientes del hormigón además del cemento, del agua, y de los áridos que se agregan a la mezcla inmediatamente antes del mezclado o durante el mismo.

La norma Chilena que establece los requisitos para los aditivos es la NCh2182.Of95 “Hormigón y mortero – Aditivos – Clasificación y requisitos”. Según esta norma la definición de aditivo es la de un material activo agregado al hormigón en pequeñas cantidades para modificar alguna de sus propiedades por acción física, química o física – química.

Por su función los aditivos según la NCh2182 se clasifican como:

- **Plastificante:** Material que aumenta la docilidad para un determinado contenido de agua o, permite reducir el agua libre requerida para obtener una docilidad.

Estos aditivos se emplean para:

- Disminuir la cantidad de agua requerida para producir un hormigón con cierta docilidad.
- Para reducir la relación A/C, por lo tanto aumentar la resistencia.
- Aumentar la docilidad. En algunos casos este aumento hace que además se aumente la velocidad de disminución de la docilidad.

Reducen entre un 5 a 10 % de agua.

- **Retardador:** Material que disminuye la velocidad de reacción química entre el cemento y el agua retrasando el inicio de fraguado.

Los retardadores se emplean para:

- Compensar el efecto acelerante que tiene el clima cálido en el fraguado del hormigón.
- Demorar el fraguado inicial del hormigón cuando se presentan condiciones de colocados difíciles o pocos usuales.
- Retrasar el fraguado para aplicar procesos de acabados especiales.

- **Acelerador:** Material que aumenta la velocidad de reacción química entre el cemento y el agua acortando el inicio de fraguado.

Estos aditivos se emplean para acelerar el desarrollo de resistencia del hormigón a temprana edad.

- **Plastificante retardador:** Material que combina las acciones de plastificante y retardador.
- **Plastificante acelerador:** Material que combina las acciones de plastificante y acelerador.
- **Superplastificante:** Material que mediante su acción fluidificante otorga una alta docilidad o, permite una gran disminución del agua libre para una docilidad dada.

Los superplastificantes son aditivos reductores de agua de alto rango que se agregan a los hormigones de cono y A/C bajas a normales para producir hormigones fluidos de alta docilidad. Los hormigones producidos son hormigones fluidos pero trabajables.

Los reductores de agua de alto rango, también se pueden emplear para fabricar hormigones de baja A/C (alta resistencia) con trabajabilidades dentro de los límites normalmente especificados. Con el uso de estos aditivos se pueden obtener reducciones de agua de un 12 a 30 %.

- Superplastificante retardador: Material que combina las acciones de superplastificante y de retardador.
- Incorporador de aire: Material que permite que una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire sea incorporada durante el amasado y permanezcan después de endurecido.

Los aditivos incorporadores de aire se utilizan para retener intencionalmente burbujas microscópicas de aires del hormigón.

La inclusión de aire mejora drásticamente la durabilidad de los hormigones que estén expuestos a la humedad durante los ciclos de congelación y deshielo.

El aire incorporado mejora considerablemente la resistencia del hormigón contra el descascaramiento de la superficie causado por los productos químicos deshelantes. También se ve mejorada de manera importante la trabajabilidad del hormigón fresco y la segregación.

Los requisitos físicos para los aditivos se establecen por comparación de las propiedades más importantes, tales como la disminución del contenido de agua, tiempo de fraguado inicial y resistencias mecánicas, de un hormigón patrón sin aditivo con uno con aditivo con dosificaciones definidas en la norma. Los requisitos se indican en las tablas 12 y 13.

Tabla N° 12. Requisitos físicos para hormigón con aditivo plastificante, retardador, acelerador y superplastificante.

Requisitos físicos requeridos al hormigón patrón				
Tipo de aditivo	Contenido máximo de agua ¹⁾	Tiempo de fraguado inicial referido al hormigón patrón NCh 2183	Resistencia a compresión % mínimo NCh 1037	Resistencia flexotracción % mínimo NCh 1038
Tipo A Plastificante	95 %	Máx. 1 h menos Máx. 2 h más	a 3 d: 110 % a 7 d: 110 % a 28 d: 110 %	a 7 d: 100 % a 28 d: 100 %
Tipo B Retardador	—	Mín. 1 h más Máx. 6 h más	a 3 d: 90 % a 7 d: 90 % a 28 d: 90 %	a 7 d: 90 % a 28 d: 90 %
Tipo C Acelerador	—	Mín. 1 h menos máx. 3,5 h menos	a 3 d: 125 % a 7 d: 100 % a 28 d: 95 %	a 3 d: 110 % a 7 d: 100 % a 28 d: 90 %
Tipo D Plastificante retardador	95 %	Mín. 1 h más Máx. 6 h más	a 3 d: 110 % a 7 d: 110 % a 28 d: 110 %	a 7 d: 100 % a 28 d: 100 %
Tipo E Plastificante acelerador	95 %	Mín. 1 h menos máx. 3,5 h menos	a 3 d: 125 % a 7 d: 110 % a 28 d: 110 %	a 3 d: 110 % a 7 d: 100 % a 28 d: 100 %
Tipo F Superplastificante	88 %	Máx. 1 h menos Máx. 2 h más	a 3 d: 125 % a 7 d: 115 % a 28 d: 110 %	a 3 d: 110 % a 7 d: 100 % a 28 d: 100 %
Tipo G Superplastificante retardador	88 %	Mín. 1 h más Máx. 6 h más	a 3 d: 125 % a 7 d: 115 % a 28 d: 110 %	a 7 d: 100 % a 28 d: 100 %

1) Agua de amasado referida a los áridos en estado saturado con superficie seca (sss) con respecto a la dosis de agua libre del hormigón patrón.

Tabla N°13. Requisitos para hormigones con aditivo Tipo H: Incorporador de aire

Ensayo	Requisitos físicos referidos al hormigón patrón
Tiempo de fraguado inicial, según NCh 2183, máximo	+/- 1 h
Resistencia a compresión y flexotracción a cualquier edad según NCh1037 y NCh1038, mínimo ^{1) 2)}	Con 5 % aire incorporado: 70% Con 4 % aire incorporado: 75% Con 3 % aire incorporado: 80%
Densidad real saturada a 28 d según NCh2186, disminución mínima ^{1) 2)}	Con 5 % aire incorporado: 50 kg/m ³ Con 4 % aire incorporado: 25 kg/m ³ Con 3 % aire incorporado: 15 kg/m ³
Ensayo	Requisitos físicos referidos a probetas con aditivo
Densidad saturada a 3 d, según NCh2186, diferencia máxima entre los promedios de las 2 amasadas	20 kg/m ³
Contenido de aire, según NCh2184, diferencia entre 2 amasadas consecutivas, máximo	1 %
Durabilidad 50 ciclos congelación/deshielo con 5 % de aire, expansión máxima medida en 3 de las 4 probetas, según NCh2185 ³⁾	0,05 %

- 1) Los contenidos de aire para el cumplimiento de los requisitos de resistencia y densidad real saturada se refieren al contenido de aire medido en el hormigón con aditivo, aproximando el valor al entero más próximo.
- 2) Las probetas utilizadas para determinar la densidad real saturada son las mismas que se emplean en el ensayo de resistencia a compresión.
- 3) Este requisito es necesario cuando el aditivo se emplea en hormigones que van a estar en forma permanentemente sometidos a ciclos de congelación/deshielo

Además de estas 2 tablas de requisitos opcionalmente se pueden especificar requisitos de retracción.

La efectividad de los aditivos en el hormigón es función de:

- Composición química del aditivo.
- De la temperatura del hormigón.
- De la composición y finura del cemento.
- Del contenido de cemento.
- Presencia de otro aditivo.