



Universidad de
los Andes



**FACULTAD
DE INGENIERÍA
Y CIENCIAS
APLICADAS**

Tecnología del Hormigón

Taller 3

Profesor:

Alvaro Paul

Ayudante:

Felipe Ronda

Alumnos:

Felipe Vicencio

Lukas Wolff

22 de octubre de 2025

1. Introducción

El control de la resistencia del hormigón en obra es un aspecto fundamental para la gestión eficiente y segura del proceso constructivo. En este contexto, el Taller 3 busca aplicar diferentes metodologías de estimación de resistencia, relacionando la dosificación, el historial térmico y el tiempo de curado del material, con el fin de comprender su influencia en las decisiones técnicas y económicas que se adoptan durante la ejecución de estructuras de hormigón armado.

El taller se estructura en tres partes complementarias. En primer lugar, se estudia el método de madurez, el cual permite estimar la resistencia del hormigón a partir de su historial de temperatura interna. Este método, ampliamente utilizado en terreno, se basa en el principio de que una mezcla específica alcanza una misma resistencia cuando presenta el mismo índice de madurez, lo que permite determinar el tiempo equivalente necesario para realizar operaciones críticas, como el postensado o el retiro de moldajes.

En la segunda parte se aborda el análisis de la presión de moldajes, considerando los factores que influyen en la carga lateral ejercida por el hormigón fresco, tales como la velocidad y altura de colocación, la densidad y la temperatura de la mezcla. Este análisis permite comprender la importancia de una correcta planificación del vaciado y del diseño del sistema de encofrado para garantizar la seguridad estructural y la continuidad del proceso constructivo.

Finalmente, la tercera parte aplica los métodos empíricos de Bolomey y Venuat para estimar la resistencia del hormigón en función de su razón agua/cemento y del tiempo. El método de Bolomey permite determinar la dosis de cemento necesaria para alcanzar una resistencia objetivo a una edad específica, mientras que el de Venuat relaciona la resistencia con el tiempo de curado mediante una función logarítmica. Ambos métodos se aplican en un caso práctico donde se busca optimizar el tiempo de desmolde y los costos de operación en columnas de obra gruesa, comparando alternativas con cemento corriente y de alta resistencia inicial.

El objetivo general del taller es integrar los conceptos de madurez, presión de moldajes y estimación de resistencia para desarrollar una comprensión global del comportamiento del hormigón en distintas etapas del proceso constructivo, fortaleciendo la capacidad de análisis y toma de decisiones técnicas en el ámbito de la tecnología del hormigón.

2. Desarrollo

Parte 1: Madurez

En primer lugar se determina la madurez del hormigón según el método de Plowman, para luego determinar el tiempo necesario para alcanzar la resistencia requerida con los metodos de Nurse-Saul como la de Freieslaben, Hansen y Pedersen.

Plowman

Considerando una temperatura de terreno de 23 °C (T_r), así como T_D tiene un valor de 0 °C, se calcula la madurez como:

$$M = t_{eq}(T_r - T_D) \quad \text{donde} \quad t_{eq} = 13,27 \quad (1)$$

A partir de los datos entregados, se obtiene la siguiente tabla:

Edad [días]	Temperatura [°C]	Resistencia MPa	dt días	T prom C	Madurez C*h	Madurez C*día	Plowman C*hr
0	29	0	0	—	0	0	0
0.25	39	0.39	0.25	34	8.5	7	168
0.5	49	0.88	0.25	44	19.5	14	336
0.75	54	1.42	0.25	51.5	32.375	21	504
1	59	2.01	0.25	56.5	46.5	28	672
1.5	64	3.29	0.5	61.5	77.25	42	1008
2	59	4.47	0.5	61.5	108	56	1344
2.5	48	5.43	0.5	53.5	134.75	70	1680
3	44	6.31	0.5	46	157.75	84	2016
3.5	39	7.09	0.5	41.5	178.5	98	2352
4	34	7.77	0.5	36.5	196.75	112	2688
4.5	29	8.35	0.5	31.5	212.5	126	3024
5	26	8.87	0.5	27.5	226.25	140	3360
5.5	26	9.39	0.5	26	239.25	154	3696
6	23	9.85	0.5	24.5	251.5	168	4032
7	23	10.77	1	23	274.5	196	4704
8	23	11.69	1	23	297.5	224	5376
9	23	12.61	1	23	320.5	252	6048
10	23	13.53	1	23	343.5	280	6720
11	23	14.45	1	23	366.5	308	7392
14	23	17.21	3	23	435.5	392	9408
21	23	23.65	7	23	596.5	588	14112
28	23	30.09	7	23	757.5	784	18816

De esta manera, interpolando la madurez obtenida, se obtiene un tiempo de 8.33 días, es decir, ese es el tiempo necesario para el hormigón en obra tenga una resistencia similar a la resistencia alcanzada a los 13.27 días en laboratorio.

Tecnología del Hormigón

Ahora, es necesario determinar la madurez del hormigón al 85 % de f_{cm} , donde considerando un hormigón G20 con 4MPa de desviación estándar, se obtiene:

$$0,85 \cdot f_{cm} = f'_c + t \cdot s = (20 + 1,282 \cdot 4) \cdot 0,85 = 21,35 \text{ MPa} \quad (2)$$

Luego se obtienen los factores K_1 y K_2 a partir de los valores de 3 y 28 días:

$$6,31 = K_1 + K_2 \log(2016) \quad (3)$$

$$30,09 = K_1 + K_2 \log(18816) \quad (4)$$

De esta forma, $K_1 = -74,698$ y $K_2 = 24,514$. Luego, la madurez para la resistencia requerida es:

$$R(M) = K_1 + K_2 \log(M) \quad (5)$$

$$21,35 = -74,698 + 24,514 \log(M) \quad (6)$$

De esta forma, la madurez requerida es de $M = 345,264$ C día.

Nurse-Saul

El método establece que el tiempo equivalente se puede calcular como:

$$\Delta t_{eq} = \frac{T_i - T_d}{T_r - T_d} \Delta t_i \quad (7)$$

De esta forma, se obtiene la siguiente tabla:

Tecnología del Hormigón

Edad [días]	Temperatura [°C]	t eqi obra [días]	t eqi lab [días]	Madurez c día
0	29	0	0	0
0.25	39	0.423913043	0.39	7
0.5	49	0.956521739	0.88	14
0.75	54	1.543478261	1.42	21
1	59	2.184782609	2.01	28
1.5	64	3.576086957	3.29	42
2	59	4.858695652	4.47	56
2.5	48	5.902173913	5.43	70
3	44	6.858695652	6.31	84
3.5	39	7.706521739	7.09	98
4	34	8.445652174	7.77	112
4.5	29	9.076086957	8.35	126
5	26	9.641304348	8.87	140
5.5	26	10.20652174	9.39	154
6	23	10.70652174	9.85	168
7	23	11.70652174	10.77	196
8	23	12.70652174	11.69	224
9	23	13.70652174	12.61	252
10	23	14.70652174	13.53	280
11	23	15.70652174	14.45	308
14	23	18.70652174	17.21	392
21	23	25.70652174	23.65	588
28	23	32.70652174	30.09	784

Luego, interpolando la madurez obtenida, se obtiene un tiempo de 17.037 días en obra y 15.674 días en laboratorio para alcanzar la resistencia requerida de 21.35 MPa.

Freiesleben Hansen y Pedersen

El metodo establece que el tiempo equivalente se puede calcular como:

$$t_{eq} = \sum e^{-Q \cdot (\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s})} \Delta t_i \quad (8)$$

Donde Q corresponde a la energia de activacion, para cemento tipo I Q = 5000. Por simplicidad, se considerara que para cemento tipo II Q no varia.. De esta forma, se obtiene la siguiente tabla:

Tecnología del Hormigón

Edad	Temperatura	Madurez	K prom	teq obra	teq lab
0	29	0	273.15	0	0
0.25	39	7	307.15	0.457650536	0.40864708
0.5	49	14	317.15	1.222276193	1.091399566
0.75	54	21	324.65	2.322859691	2.074136823
1	59	28	329.65	3.713048795	3.315469833
1.5	64	42	334.65	7.200620997	6.429606238
2	59	56	334.65	10.6881932	9.543742643
2.5	48	70	326.65	13.10702707	11.7035771
3	44	84	319.15	14.79507793	13.21087797
3.5	39	98	314.65	16.14428463	14.41561682
4	34	112	309.65	17.1881452	15.34770482
4.5	29	126	304.65	17.98899055	16.06279874
5	26	140	300.65	18.63274066	16.63761856
5.5	26	154	299.15	19.22498612	17.16644866
6	23	168	297.65	19.76938993	17.65255981
7	23	196	296.15	20.76938993	18.54548366
8	23	224	296.15	21.76938993	19.43840751
9	23	252	296.15	22.76938993	20.33133136
10	23	280	296.15	23.76938993	21.22425522
11	23	308	296.15	24.76938993	22.11717907
14	23	392	296.15	27.76938993	24.79595062
21	23	588	296.15	34.76938993	31.04641759
28	23	784	296.15	41.76938993	37.29688455

Luego, interpolando la madurez obtenida, se obtiene un tiempo de 26.100 días en obra y 23.305 días en laboratorio para alcanzar la resistencia requerida de 21.35 MPa.

Las razones en la diferencia de cada método radica en que el modelo Nurse-Saul es un modelo más simple y lineal, que no considera los efectos de la reacción. En cambio, el modelo de Freiesleben Hansen y Pedersen considera la energía de activación y la variación de la temperatura, en un modelo exponencial, lo que lo hace más preciso para predecir la resistencia del hormigón en función del tiempo y la temperatura. Ahora bien, la energía de activación en este último método juega un rol fundamental, donde se observa que a valores mayores, el tiempo equivalente aumenta, lo cual se traduce en que la reacción ocurre más lento.

Parte 2: Presión de Moldajes

Se tienen los siguientes datos de entrada:

Tipo de Cemento	Cono de Asentamiento (mm)	Densidad (kg/m ³)	Altura de Colocación (m)	Temperatura (°C)	Presión Lateral (kPa)
II	148	2376	6.1	16.4	89

Los cuales fueron ingresados en la calculadora de presión de moldajes de la página [PERI](#). Los datos fueron ingresados como se muestra en la siguiente imagen:

Standard Selection	
Standard	ACI 347R-14
Imperial units	<input checked="" type="checkbox"/>
Boundary Conditions	
Wall / base	<input checked="" type="radio"/>
Column	<input type="radio"/>
Concrete type	(I) Concrete type I, II or III (
Concrete slump (mm)	148
Concrete density ρ (kg/m ³)	2376
Placing temperature T (°C)	16
Height of concrete placement h (m)	6.10
Internal vibration depth ≤ 1.2 m	<input checked="" type="checkbox"/>
Construction Description	
Show parameters	<input type="checkbox"/>
Input Values	
Max. lateral pressure C_{CPmax} (kPa)	89.0
Max. rate of placement R (m/h)	
Calculate	

Figura 1: Datos ingresados en la calculadora de PERI

Lo cual da el siguiente resultado:

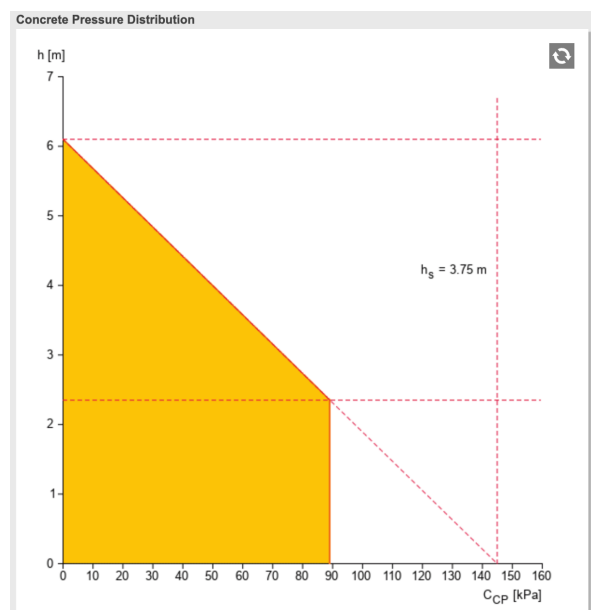


Figura 2: Resultado de la calculadora de PERI

Donde no se genera un límite del hormigonado, por lo tanto, se puede realizar la solicitud de 10 m/h sin problemas.

Ahora bien, si la presión máxima es un 80 % de la presión indicada, es decir, 71.2 kPa, para mantener el rendimiento de 10 m/h , se propone disminuir la densidad del hormigón a 2150 kg/m^3 . Ingresando este nuevo valor en la calculadora, se obtiene el siguiente resultado:

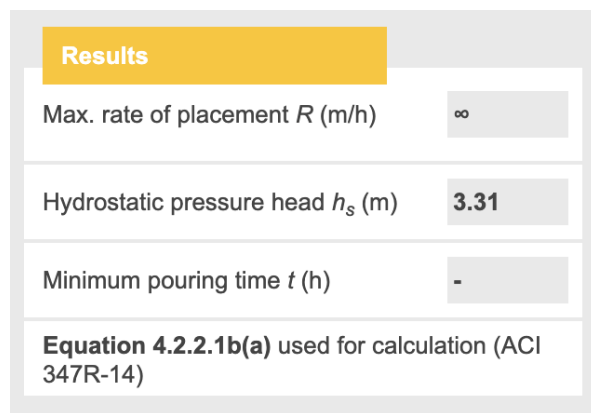


Figura 3: Resultado de la calculadora de PERI con densidad reducida

Donde el gráfico de distribución de presión es:

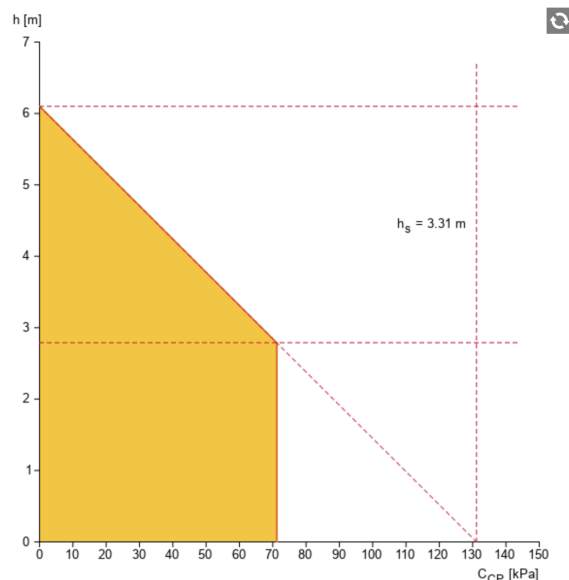


Figura 4: Distribucion de presion con densidad reducida

Para lograr tal objetivo, se puede generar un hormigón con agregados livianos.

Parte 3: Bolomey y Venuat

En esta parte se requirió determinar el tiempo mínimo de desmolde de una columna para optimizar el presupuesto de la obra. Se compararon los tiempos de desmoldado utilizando un hormigón tradicional con uno de alta resistencia. Para el desarrollo de esta sección, se utilizaron los métodos de Bolomey y Venuat, los cuales permiten estimar la resistencia del hormigón en función de su dosificación y del tiempo de curado.

A continuación, se presentan los datos utilizados, los cálculos realizados para ambos tipos de hormigón y los resultados obtenidos.

Tabla 1: Datos experimentales – Grupo 5

Parámetro	Unidad	Cem. corriente	Cem. alta resistencia
Agua utilizada	kg/m ³	166.32	153.68
Cemento mezcla 1 (Z1 / V1)	kg/m ³	432.23	324.68
Cemento mezcla 2 (Z2 / V2)	kg/m ³	312.42	381.65
Resistencia 14 días mezcla 1	MPa	20.45	24.24
Resistencia 14 días mezcla 2	MPa	15.47	33.20
Resistencia 28 días mezcla 1	MPa	27.27	29.55
Resistencia 28 días mezcla 2	MPa	22.42	43.11
Agua para columnas	kg/m ³	141	141

Resistencia a la compresión

En primer lugar, se determinó la resistencia requerida a partir de la especificada utilizando la siguiente fórmula: $f_{cm} = f_c + t \cdot s$, donde f_c es la resistencia especificada, t es un factor de seguridad y s es la desviación estándar del hormigón.

Tabla 2: Resistencia requerida para el desmolde

Parámetro	Símbolo	Valor [MPa]
Desviación estándar	s	3.42
Factor de seguridad	t	2.113
Resistencia especificada	f'_c	28.86
Resistencia requerida	f_{cm}	36.08
Porcentaje requerido	$\%$	90
Resistencia mínima para desmolde	f_{req}	32.47

Dosis mínima de cemento

En segundo lugar, se utilizó el método de Bolomey para determinar la dosis de cemento a utilizar para alcanzar la resistencia requerida. Se utilizó esta fórmula $R = a(\frac{c}{w} - b)$ para determinar los parámetros a , b , con los cuales se obtuvo la relación c/w y finalmente de la dosis de cemento. Los sistemas de ecuaciones resueltos son los siguientes:

Para el cemento corriente:

$$\begin{cases} 20,45 = a_{14} (3,07 - b_{14}) \\ 15,47 = a_{14} (2,22 - b_{14}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 27,27 = a_{28} (3,07 - b_{28}) \\ 22,42 = a_{28} (2,22 - b_{28}) \end{cases}$$

Para el cemento de alta resistencia:

$$\begin{cases} 24,24 = a_{14} (2,31 - b_{14}) \\ 33,20 = a_{14} (2,71 - b_{14}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 29,55 = a_{28} (2,31 - b_{28}) \\ 43,11 = a_{28} (2,71 - b_{28}) \end{cases}$$

Tabla 3: Parámetros obtenidas por el método de Bolomey para cada tipo de cemento

Parámetro	Cemento corriente	Cemento alta resistencia
c/w - Mezcla 1 (Z1 / V1)	3.07	2.31
c/w - Mezcla 2 (Z2 / V2)	2.22	2.71
a_{14}	5.85	22.15
b_{14}	-0.42	1.21
a_{28}	5.70	33.51
b_{28}	-1.72	1.42
c/w	4.62	2.50
c	650.12 [kg/m ³]	352.10 [kg/m ³]

Tiempo de desmolde

En esta sección, se utilizó el método de Venuat para determinar el tiempo mínimo de desmolde para ambos tipos de cemento. Los sistemas resueltos son los siguientes, utilizando la ecuación de Venuat:

Tecnología del Hormigón

Cemento corriente:

$$\begin{cases} 29,51 = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(14) \\ 36,08 = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(28) \end{cases}$$

Cemento de alta resistencia:

$$\begin{cases} 28,55 = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(14) \\ 36,08 = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(28) \end{cases}$$

Posteriormente, se despejó el tiempo necesario para alcanzar la resistencia mínima requerida para el desmolde, utilizando la misma ecuación de Venuat, dando como resultado los siguientes parámetros:

Tabla 4: Constantes obtenidas mediante el método de Venuat

Tipo de cemento	$R_{14}[MPa]$	K_1	K_2	$t_{desmolde}$
Cemento corriente	29.51	4.48	21.84	19.14 días
Cemento alta resistencia	28.55	-0.13	25.02	20.09 días

Comparación de costos de proyecto

Obtenido el tiempo de desmolde para cada tipo de cemento y los costos asociados a las variables, se determinó el siguiente cuadro comparativo de costos:

Tabla 5: Análisis de costos por tipo de cemento

Concepto	Unidad	Cemento corriente	Cemento alta resistencia
Costo del cemento	\$/kg	100	140
Costo de moldajes	\$/día	400	400
Consumo de cemento	kg/m ³	650.12	352.10
Duración del moldaje	días	19.14	20.09
Costo total por 1 m ³	\$	72668	57329

A partir de los resultados obtenidos mediante los métodos de Bolomey y Venuat, se observa que el uso de cemento de alta resistencia inicial presenta una mejor relación entre consumo de material, resistencia alcanzada y costo total por metro cúbico de hormigón. Aunque el costo unitario del cemento de alta resistencia es mayor, su menor dosificación requerida compensa la diferencia.

El tiempo estimado de desmolde es similar, con 19,14 (20) días para el cemento corriente y 20,09 (20) días para el cemento de alta resistencia, la cual es una diferencia que no afecta el proceso constructivo.

Al integrar ambos factores en el análisis económico, el costo total del elemento resulta menor para el cemento de alta resistencia (57.329 \$ por m³) en comparación con el cemento corriente (72.668 \$ por m³). Por tanto, la alternativa que minimiza los costos del proyecto es el cemento de alta resistencia, ya que logra la resistencia requerida con menor material y menor costo total, manteniendo el desempeño estructural.

Discusión

Pregunta 1

La velocidad de colocación influye directamente en la distribución de la presión lateral del hormigón fresco. Cuando la colocación es rápida, el hormigón no alcanza a fraguar en las capas de abajo, generando una pseudo

presión hidrostática sobre los moldajes. En cambio, una colocación lenta permite que las primeras capas se endurezcan, reduciendo los esfuerzos laterales. El bombeo continuo o el vertido en capas controladas pueden modificar esta distribución, siendo el vibrado interno un factor adicional que puede aumentar la presión lateral al reducir la viscosidad del material.

Pregunta 2

A mayor temperatura, se acelera el fraguado y la pérdida de trabajabilidad, reduciendo el tiempo durante el cual el hormigón ejerce presión máxima sobre los moldajes. En cambio, a bajas temperaturas el proceso de hidratación es más lento, aumentando el tiempo de presión hidrostática. Temperaturas extremas pueden alterar la microestructura del cemento: en climas cálidos aumenta la evaporación superficial, y en fríos, el riesgo de congelamiento y retraso del endurecimiento. Por ello, los factores climáticos deben ser considerados al definir tasas de colocación y tiempos de descimbre.

Pregunta 3

Un calculo conservador en la presion de los moldajes es calcular la columna de hormigon, es decir:

$$p = \gamma \cdot g \cdot h \quad (9)$$

Donde h corresponde a la altura de colocacion. Por lo tanto, se puede decir que la presion tiene una relacion directamente proporcional a la altura de colocacion. Ahora bien, en la practica, y como se vio reflejado en el desarrollo del taller, la presion maxima real es menor a la columna, por efectos del praguado mismo que ocurre en el hormigon, asi como la interaccion interna de la pasta de cemento.

De esta forma, este factor juega un roll fundamental al hormigonar elementos de gran altura, con dificaíl acceso, lo que dificulta la labor de colocacion de puntales, asi como la velocidad de colocacion del hormigon, lo que puede generar presiones mayores a las esperadas. Asi mismo, otra aplicacion en que la consideracion de tal factor juega un roll critico es en las construcciones con moldajes deslizantes, donde la velocidad de ascenso del molde debe ser controlada para evitar presiones excesivas.

Pregunta 4

Claramente, las principales ventajas del metodo de madurez es que permite estimar la resitencia del hormigon en obra a partir de muestras de laboratorio, lo que permite un control riguroso sin afectar directamente el proceso cosntructivo. Ahora bien, tiene limitaciones frente a elementos como hormigones masivos, donde las variaciones de temperatura internas pueden ser significativas, lo que puede llevar a errores en la estimacion de la resistencia. Ademas, requiere de un monitoreo continuo de la temperatura, lo que puede ser logísticamente desafiante en obra, ya que se dben instalar sensores en lugares clave, lo que requiere mano de obra especializada y costos adicionales.

Otros factores como la geometria juega un roll importante, ya que elementos delgados tienden a disipar mejor la temperatura que elementos con formas cuadradas como una fundacion aislada. Asi mismo, las condiciones de curado y condiciones climaticas externas afectan la ganancia de resistencia, ya que puede promover o inhibir la reaccion de hidratacion del cemento.

De esta forma, se espera que el metodo de madurez tienda a ser mas preciso en elementos delgados y convencionales, como losas vigas o muros, mientras que en elementos masivos o con condiciones de curado no controladas, puede presentar limitaciones significativas.

Pregunta 5

El tipo de cemento afecta la estimación de madurez sobre todo en el método de Freiesleben Hansen y Pedersen, ya que la energía de activación (Q) varía entre tipos de cemento. Cementos con mayor contenido de clínker o aditivos especiales pueden tener diferentes tasas de reacción, lo que afecta la velocidad de ganancia de resistencia. En el método de Nurse-Saul, el tipo de cemento influye indirectamente a través de la temperatura alcanzada durante la hidratación, pero no se considera en la ecuación misma.

Ahora bien, si para calcular la presión ejercida por el hormigón solo se realiza la estimación de columna de hormigón, el tipo de cemento no afecta mucho la presión máxima, ya que no se esperan variaciones grandes en la densidad. Ahora bien, si se consideran factores como la velocidad de colocación, el fraguado y la pérdida de trabajabilidad, el tipo de cemento puede afectar indirectamente la presión ejercida, ya que cementos de fraguado rápido pueden ayudar a reducir la presión máxima al acelerar el endurecimiento del hormigón.

Materiales cementicios suplementarios como

Pregunta 6

El método de Bolomey relaciona la resistencia con la dosificación y la razón w/c . El método de madurez, en cambio, se basa en la evolución de temperatura del hormigón, permitiendo estimar la resistencia real en obra. Bolomey es útil para estimaciones iniciales o cuando no hay registros térmicos, mientras que el de madurez, es para monitoreo en tiempo real. El primero asume condiciones de curado estables, mientras que el segundo las incorpora explícitamente. En proyectos donde se busca precisión operativa, el método de madurez es mejor. Para control de planta, Bolomey es más práctico.

Pregunta 7

Las constantes a y b representan la sensibilidad del hormigón frente a variaciones en la dosificación y la calidad de los materiales. Cambios en el tipo de cemento o en los agregados modifican la relación w/c efectiva y, así, la pendiente y el intercepto de la ecuación de Bolomey. Ante un cambio de materiales, se deben realizar ensayos de resistencia a diferentes razones c/w y ajustar los parámetros a y b . Esto permite recalibrar el modelo y mantener la exactitud en la predicción de resistencias.

Pregunta 8

Según la relación de Bolomey, la resistencia a compresión es directamente proporcional a $(c/w - b)$. Si se reduce la cantidad de cemento en un 10% manteniendo constante el agua, la razón c/w también disminuye en un 10%, reduciendo proporcionalmente la resistencia. Esta variación implica una disminución en la resistencia inicial, dependiendo del valor de b y del tipo de cemento.

Pregunta 9

Aplicando el método de Venuat, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$17,21 = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(14) \quad (10)$$

$$30,09 = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(28) \quad (11)$$

Tecnología del Hormigón

Resolviendo el sistema, se obtiene que $K_1 = -31,828$ y $K_2 = 42,78$. Luego, para determinar el tiempo necesario para alcanzar la resistencia requerida, se utiliza la misma ecuación de Venuat:

$$21,35 = -31,828 + 42,78 \cdot \log_{10}(t) \quad (12)$$

De lo que se obtiene un tiempo de 17.502 días.

Pregunta 10