

Empuje del hormigón fresco sobre un encofrado

Víctor Yepes Piqueras [@vyepesp](#)

Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil

Universitat Politècnica de València

Introducción

El peso y la presión del hormigón fresco son los principales factores que condicionan el dimensionamiento de los encofrados, por encima de los efectos del peso propio, el viento, la nieve o la sobrecarga de uso. Por ello, la determinación de las sollicitaciones del hormigón antes de su endurecimiento requiere entender los factores básicos que permiten cuantificar, aunque sea de forma aproximada, estas acciones.

La determinación del empuje del hormigón fresco sobre el fondo de losas y vigas supone multiplicar el peso específico del hormigón por la altura que presenta sobre dicho fondo. El caso del empuje horizontal sobre un encofrado se podría realizar suponiendo que el hormigón fresco se encuentra en estado fluido. Sin embargo, este tipo de cálculo hidrostático sobreestima la presión, especialmente para alturas superiores a 3 m. Las evidencias empíricas muestran que la presión hidrostática se bloquea a partir de cierta profundidad, lo cual permite ajustar mejor el cálculo del empuje.

Al igual que ocurre con los áridos sin cohesión (arena, grava, etc.), al verterse el hormigón fresco sobre un plano horizontal, éste adoptará una forma de cono de revolución con un ángulo de talud natural o ángulo de rozamiento interno. Si se trunca dicho cono con un encofrado, las paredes se ven sometidas a lo que se llamará **presión granulostática**. Si se anula dicho ángulo de rozamiento interno mediante el proceso del vibrado del hormigón, éste se comporta paulatinamente como un fluido imperfecto, ejerciendo una presión distinta que se denominará **presión hidrostática**. Entre una capa ya vibrada, que ha recuperado su ángulo de rozamiento interno, y que ejerce una presión sobre las paredes de tipo granulostática, y la siguiente capa que está en proceso de vibración, -y por tanto con presión hidrostática- debe existir una zona de transición para que se mantenga la continuidad de las leyes de presiones (Figura 1).

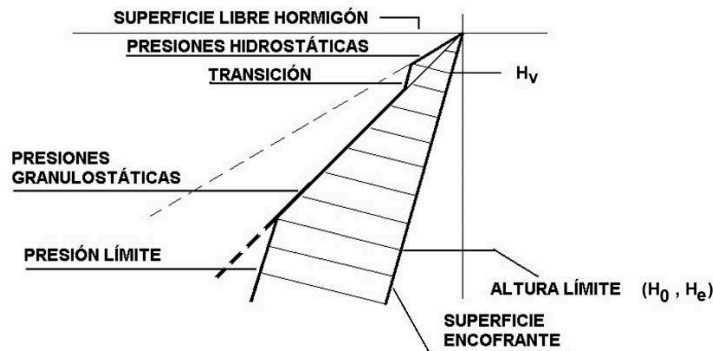


Figura 1. Empuje del hormigón fresco (Martín Palanca, 1982)

El progresivo endurecimiento del hormigón provoca que se dejen paulatinamente de ejercer presiones sobre el encofrado al aumentar el espesor hormigonado. Por tanto, existe cierta profundidad límite por debajo de la cual el hormigón ya ha fraguado, manteniéndose la presión constante en el valor máximo alcanzado durante el proceso de hormigonado. Ello implica la limitación del crecimiento indefinido de las presiones del hormigón con la profundidad. Otra restricción es la cuasi-constancia de las presiones a partir de una nueva profundidad límite por el llamado “efecto silo” (aparición de fuerzas de fricción tangenciales a la pared debido al rozamiento de las partículas que integran el hormigón fresco y la superficie encofrante) al hormigonar elementos de espesores reducidos en relación con su dimensión vertical. Este efecto es muy habitual en encofrados de pilares y muros de poco espesor. Así, tomando como altura límite la menor de los valores antes citados, se puede completar, para cada fase del hormigonado, la ley de presiones sobre el encofrado.

Factores que influyen en la presión del hormigón fresco

Son cuantiosas las variables que influyen en la presión del hormigón fresco sobre un encofrado. Sin embargo, tal y como se puede ver en la Tabla 1, no todos los factores son igual de importantes.

Tabla 1. Orden de influencia de las variables en la máxima presión lateral (Santilli, 2010)

Primer orden	Segundo orden	Tercer orden
Velocidad de llenado	Contenido de cemento	Tipo y tamaño máximo del árido grueso
Peso específico del hormigón	Contenido de árido grueso	Uso de retardadores de fraguado
Profundidad a la que se sumergen los vibradores	Fricción contra las paredes del encofrado	Temperatura ambiente
Consistencia del hormigón	Relación agua/cemento	Forma de la sección transversal
Temperatura del hormigón	Uso de plastificantes o superplastificantes	Colocación de armaduras longitudinales
Dimensión de la sección transversal	Deformación del encofrado	Duración de la vibración
Uso de adiciones en elevadas proporciones	Potencia de los vibradores	Altura de vertido
	Permeabilidad del encofrado	

Ha de tenerse en cuenta que el espesor de pared a llenar no tiene influencia en la presión del hormigón, pero sí la velocidad de llenado vertical; por tanto, en paredes delgadas se tendrán mayores presiones. Por otra parte, y considerando que los sistemas de encofrado convencionales soportan presiones entre 60 y 80 kN/m², es prioritario limitar la velocidad de llenado del hormigón para evitar sobrepasar estos límites. Otra opción sería reforzar el encofrado.



Se analiza a continuación la influencia de las variables más significativas.

- a) **Velocidad ascendente del hormigonado:** Cuanto más rápido sea el llenado, mayor será la altura de hormigón sin fraguar. En esta zona el hormigón se encuentra en estado semilíquido con una ley de presiones proporcional al peso específico y a la profundidad.
- b) **Temperatura de fraguado:** Los procesos químicos del fraguado son más lentos cuando desciende la temperatura. Ello implica una mayor lentitud en el fraguado y un efecto análogo al de un aumento de velocidad en el llenado. La presión aumenta considerablemente por debajo de 15°C.
- c) **Docilidad del hormigón (cono de Abrams):** A mayor docilidad existe un menor talud natural del hormigón, y por tanto, un mayor empuje en la zona de empujes granulostáticos.
- d) **Inclinación de la superficie encofrante:** El empuje activo del hormigón se puede expresar en función de la inclinación del parámetro encofrante “ α ” respecto a la vertical y el talud natural del hormigón “ β ”. Se comprueba que el empuje es mayor si el hormigón gravita sobre el encofrado ($\alpha > 0$). El coeficiente de empuje activo, que modificaría la presión hidrostática del hormigón, sería:

$$K_a = \frac{1 + \sin(\alpha - \beta)}{1 + \sin(\alpha + \beta)}$$

Hay que tener en cuenta que cuando el encofrado se dispone en desplome hay que considerar el efecto de boyancia (Figura 2), donde hay presiones verticales que pueden llegar a levantar el encofrado.

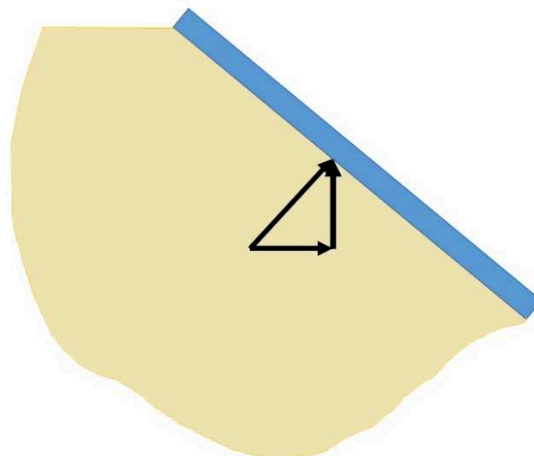


Figura 2. Fenómeno de boyancia sobre el encofrado

- e) **Profundidad de vibrado:** El vibrado devuelve al hormigón su fluidez y por tanto hace aumentar la presión, por lo que a mayor profundidad de vibrado, mayor empuje. En el caso de vibradores externos, se supone una ley hidrostática, pues la cohesión se anula en toda la altura encofrada.
- f) **Frecuencia y potencia de vibración:** El encofrado forma parte de una estructura con un periodo propio de vibración. Si la vibración se aproxima a esta frecuencia, se amplificarán las deformaciones. Este efecto se calcula con un coeficiente de amplificación sobre las presiones estáticas. Además, cuanto mayor sea la potencia del vibrador, mayor volumen de hormigón se encontrará con presiones hidrostáticas.

- g) **Dosificación del cemento:** A mayor cantidad de cemento empleado por volumen de hormigón, mayor será el empuje horizontal del hormigón fresco.
- h) **Los aditivos:** Si bien el efecto de los aireantes no es significativo, los retardadores y fluidificantes aumentan los empujes.
- i) **Los áridos:** Una granulometría discontinua presenta menor rozamiento interno que una bien graduada, por tanto tendrá un asiento mayor y un comportamiento más cercano a los líquidos, y como consecuencia, ejercerán mayor presión.
- j) **Las armaduras:** En elementos fuertemente armados, la presión del hormigón fresco puede ser significativamente menor debido al rozamiento interno de dichas armaduras, que suponen un obstáculo al libre flujo del hormigón.
- k) **Altura de vertido:** Los hormigones vertidos desde mayores alturas provocan cargas dinámicas que deberían absorberse con encofrados más rígidos. Por tanto, se debe limitar dicha altura de vertido al menor valor posible.

El cálculo del empuje del hormigón fresco se debe realizar acudiendo a distintas normas o métodos que suponen una buena aproximación a la presión ejercida por el hormigón fresco, pero para grandes alturas las presiones que pueden alcanzarse en la base del encofrado superan las indicadas. En estos casos, o bien se realiza un hormigonado suficientemente lento, o bien se hace necesario un estudio en profundidad.

Norma alemana DIN-18218

La **norma DIN-18218** establece una serie de fórmulas empíricas desarrolladas a partir de datos experimentales. Las presiones calculadas con esta norma se encuentran razonablemente del lado de la seguridad hasta alturas de 5 m (Gallego *et al.*, 2006). Por encima de este valor, convendría un estudio detallado para evitar sorpresas en obra. Esta norma DIN suele usarse mucho en España, puesto que la mayoría de los encofrados se fabrican en Alemania. Las hipótesis que usa esta norma son las siguientes:

- Tamaño máximo de árido de 63 mm
- Encofrados verticales con una desviación máxima de $\pm 5^\circ$ respecto a la vertical
- Peso específico del hormigón $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$
- Temperatura de hormigonado: 15°C
- Tiempo de fraguado máximo de 5 horas
- Velocidad máxima de ascenso del hormigón: $V \leq 7 \text{ m/h}$

Según se muestra en la Figura 3, la norma DIN considera una ley de empujes hidrostática hasta un valor de presión máxima P_m , a partir de donde se considera un empuje constante. A una profundidad de $5V$ (siendo V la velocidad ascendente del hormigón en m/h) la presión máxima desaparece al considerarse que el hormigón ya ha fraguado lo suficiente como para no empujar. Esta profundidad es muy importante para trabajar con encofrados deslizantes. En el caso de que el peso específico del hormigón fresco γ sea diferente de 25 kN/m^3 , se puede corregir la presión multiplicándola por $\gamma/25$.

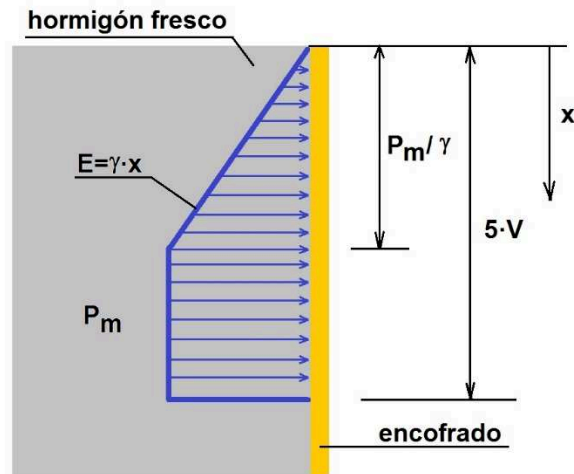


Figura 3. Empuje del hormigón fresco según norma DIN-18218

La presión máxima P_m se puede obtener de la Tabla 2. Para el caso de pilares, la presión máxima P_m no sobrepasará el valor de 100 kN/m^2 . Si se trata de muros, no excederá de 80 kN/m^2 . En ambos casos, tampoco será P_m mayor a la presión hidrostática $25H \text{ kN/m}^2$. Es importante señalar que existe una tendencia muy elevada a fabricar hormigones de consistencia fluida en el mercado actual.

Tabla 2. Presión máxima P_m del hormigón fresco (DIN-18218)

Consistencia	Cono de Abrams (mm)	P_m (kN/m ²)
Seca	0-20	$5V + 21$
Plástica	30-50	$10V + 19$
Blanda	60-90	$14V + 18$
Fluida	100-150	$17V + 17$

Los valores anteriores se modificarán en función de la temperatura del hormigón fresco. Así, para temperaturas por encima de 15°C , se podrá reducir la presión un 3% por cada grado, sin pasarse de un 30% y siempre que la temperatura del hormigón permanezca constante. Para temperaturas inferiores a 15°C , se aumentará la presión un 3% por cada grado. Si la temperatura exterior es inferior a 15°C y no hay aislamiento térmico, hay que considerar un aumento de la presión de un 3% por cada grado, independientemente de la temperatura interna del hormigón.

Para valorar la influencia de los retardadores, la presión del hormigón fresco se multiplica por los factores indicados en la Tabla 3. Esta tabla sólo sirve para alturas de hormigonado inferiores a 10 m. Se pueden interpolar linealmente los valores intermedios.

Tabla 3. Influencia de los retardadores en el empuje del hormigón fresco (DIN-18218)

Consistencia	Cono de Abrams (mm)	Coeficientes de fraguado para un retardo de	
		5 horas	15 horas
Seca	0-20	1,15	1,45
Plástica	30-50	1,25	1,80
Blanda-Fluida	60-150	1,40	2,15

Norma UNE 18201:2016

La norma española UNE 18201:2016 presenta muchas similitudes con la norma DIN-18218. Las hipótesis contempladas por esta norma son las siguientes:

- Hormigón convencional, colocado en obra de modo habitual (llenando el encofrado vertiendo el hormigón sin presión y empleando vibración interior aplicada a las sucesivas tongadas para su compactación)
- Tamaño máximo de árido de 63 mm
- Encofrados verticales con una desviación máxima de $\pm 5^\circ$ respecto a la vertical
- Peso específico del hormigón γ , en el rango del hormigón ligero, convencional (25 kN/m^3) o de alta resistencia (26 kN/m^3)
- Valor del asiento del cono de Abrams $\leq 12 \text{ cm}$
- Temperatura del hormigón fresco durante su colocación en obra: 15°C
- Temperatura ambiente durante la colocación del hormigón en obra: 15°C
- Tiempo de fraguado máximo de 10 horas
- Velocidad máxima de ascenso del hormigón: $V \leq 7 \text{ m/h}$
- Vibración interna, mediante vibradores de aguja

Al igual que en la norma DIN, la presión del hormigón es hidrostática hasta una profundidad límite, en la que se estabiliza. La presión límite se mantiene si el encofrado no ha sido liberado y se anula la presión si el encofrado se ha liberado.

Con dichas hipótesis, la norma UNE 18201 proporciona una tabla de valores límite en función de la velocidad de vertido V (m/h) y del tiempo de fraguado (desde que se produce el primer contacto entre el agua y el cemento, hasta que finaliza el fraguado). El tiempo de fraguado no supera las 10 h en el caso de un hormigón de fraguado normal ni las 7 h en el caso de un hormigón de fraguado rápido. En la Tabla 4 se pueden interpolar los valores.

Tabla 4. Profundidad límite del hormigón fresco, en metros (UNE 18201)

V (m/h)	Tiempo fraguado ≤ 10 h	Tiempo fraguado ≤ 7 h
1,50	2,90	2,20
3,00	4,65	3,45
6,00	8,15	6,10

Los valores anteriores se modifican en función de la temperatura real del hormigón fresco durante su colocación en obra del mismo modo que en la norma DIN. Sin embargo, la norma permite que, actuando conservadoramente, no es necesario introducir corrección alguna cuando el valor de la temperatura ambiente durante la colocación del hormigón en obra supere los 15°C .



La norma indica que se debe utilizar el empuje hidrostático, sin bloquear la profundidad límite, cuando no se cumplan las condiciones anteriores. En particular cuando:

- Toda la profundidad del hormigón está sometida al efecto de la vibración (interna o externa).
- El hormigón se introduce, a presión, desde la cota inferior del encofrado y asciende por el interior del mismo hasta llenarlo completamente. En este caso, hay que considerar la sobrepresión introducida.
- El empleo de retardadores aumente el tiempo de fraguado por encima del considerado en la Tabla 4.
- Cuando el hormigón presente un cono de Abrams superior a 12 cm.
- Cuando el hormigón sea autocompactante.

Norma americana ACI-347

Otra forma de calcular los empujes del hormigón fresco es seguir lo establecido en la Guía ACI 347 (2004). Esta norma americana supone un cono de Abrams máximo de 175 mm y compactación mediante vibración interna con una profundidad máxima de 1,2 m.

Aquí también se considera una ley inicialmente hidrostática hasta un valor de presión máxima P_m , que a partir de entonces permanece constante. En el cálculo es necesario conocer la velocidad ascendente del hormigonado V (m/h), la temperatura de fraguado del hormigón T (°C) y la altura del encofrado H (m) (para los límites de presión máxima).

En columnas o muros, con $V < 2,1$ m/h y $H < 4,2$ m

$$P_m \left(\frac{kN}{m^2} \right) = C_W \cdot C_C \cdot \left(7,2 + \frac{785 V}{17,8 + T} \right)$$

En muros, si $V < 2,1$ m/h y $H > 4,2$ m o bien si $2,1$ m/h $< V < 4,5$ m/h

$$P_m \left(\frac{kN}{m^2} \right) = C_W \cdot C_C \cdot \left(7,2 + \frac{1156 + 244 V}{17,8 + T} \right)$$

Si $V > 4,5$ m/h, la ley de presiones es hidrostática debido a la alta velocidad ascensional del hormigón.

En todos los casos, la máxima presión lateral debe ser mayor a $30 \cdot C_W$ (kN/m²), pero nunca mayor a la hidrostática. C_W es un coeficiente por unidad de peso, sus valores se muestran en la Tabla 5. C_C es un coeficiente de composición química, sus valores se muestran en la Tabla 6.

Tabla 5. Determinación del coeficiente por unidad de peso C_W (ACI 347, 2004)

Peso específico del hormigón (γ)	C_W
$\gamma < 21,97$ kN/m ³	$0,5 \cdot [1 + (\gamma/22,75)] \geq 0,80$
$21,97 \leq \gamma \leq 23,54$ kN/m ³	1,0
$\gamma > 23,54$ kN/m ³	$\gamma/22,75$

Tabla 6. Determinación del coeficiente de composición química C_c (ACI 347, 2004)

Categoría	Tipo de cemento	C_c
1	Tipo I, Tipo II o Tipo III con cualquier aditivo excepto superplastificantes o retardadores o sin aditivos	1,0
2	Tipo I, Tipo II o Tipo III con superplastificantes o retardadores	1,2
3	Otros tipos de cementos compuestos: Tipo IV o Tipo V que contengan menos del 70% de escoria de horno alto o menos del 40% de cenizas volantes sin superplastificantes ni retardadores del fraguado	1,2
4	Otros tipos de cementos compuestos: Tipo IV o Tipo V que contengan menos del 70% de escoria de horno alto o menos del 40% de cenizas volantes con superplastificantes o retardadores del fraguado	1,4
5	Otros tipos de cementos compuestos: Tipo IV o Tipo V que contengan más del 70% de escoria de horno alto o más del 40% de cenizas volantes	1,4

Teoría granulostática de Martín Palanca

También se puede calcular el empuje siguiendo la **teoría granulostática** (Martín-Palanca, 1982). Según esta teoría, la ley de empujes se compone de varios tramos: presión hidrostática, presión granulostática y el límite de empuje (ver Figura 1). También existe una zona de transición entre los dos primeros tramos. Los valores se calculan de la siguiente forma:

$$\text{Presión hidrostática} = \gamma \cdot h_v$$

$$\text{Presión granulostática} = K_a \cdot \gamma \cdot h$$

$$\text{Presión límite} = K_a \cdot \gamma \cdot \min(H_e, H_0)$$

Con esta teoría, resulta sorprendente comprobar que en la presión límite no se ha considerado la velocidad de hormigonado. Por tanto, se recomienda precaución para velocidades de llenado rápido. En estas expresiones las nuevas variables que aparecen son las siguientes: h_v es la altura de hormigón en vibración y h es la altura total de hormigón. K_a , que es el coeficiente de empuje activo definido anteriormente. El ángulo de talud natural del hormigón se calcula como sigue, siendo α el asiento de cono de Abrams en mm:

$$\text{tag } \beta = \frac{260 - \alpha}{1400}$$

Con esta teoría, el peso específico del hormigón considerado γ es de 23 kN/m³ en parámetros con inclinación menor de 45° respecto a la vertical y 25 kN/m³ para el resto de los casos.

El efecto silo se considera con la profundidad límite H_e (en metros), que puede calcularse de la siguiente forma:

$$H_e = 21000 \frac{43 - T}{(165 - \alpha) \cdot (303 + \alpha)} \cdot \frac{S}{1 + S/L}$$

T es la temperatura ($^{\circ}\text{C}$); S es el espesor mínimo del encofrado (m); L es la longitud transversal del encofrado (m). Deberá ser $L > S$. En un muro, S es el espesor y L la longitud transversal.

Por otra parte, también se puede dar una profundidad límite en función del endurecimiento, a través de la profundidad H_0 . Se calcula de la siguiente forma:

$$H_0 = H_v + V \cdot t_f$$

V es la velocidad de hormigonado en obra (m/hora), mientras que el tiempo de endurecimiento (en horas) se calcula como sigue:

$$t_f = \frac{70 + 0,3a - 2T}{25 + T}$$

Propuesta canadiense de Gardner

La **propuesta canadiense de Gardner** (1980) resulta de interés al introducir una variable dinámica como la potencia del vibrador. En este caso se establece una ley hidrostática de presiones hasta una presión límite de valor:

$$P_m = \gamma \cdot h_v + \frac{3N}{745,7 \cdot S} + \frac{S}{0,04} + \frac{400\sqrt{V}}{17,78 + T} \left(\frac{100}{100 - \%F} \right) + \frac{a - 75}{10}$$

Donde N es la potencia del vibrador en vatios; $\%F$ es el porcentaje de cenizas volantes o escoria utilizadas en sustitución de cemento. El resto de variables ya se definieron anteriormente. Como valor orientativo de la potencia del vibrador se puede tomar 1250 W, y para la profundidad de vibrado 0,5 m con vibración interna y 1 m con vibración externa.

Propuesta CIRIA Report 108

CIRIA Report 108 propone una curva de presiones hidrostática que se bloquea con una presión máxima determinada por la ecuación que sigue, en ningún caso mayor que la hidrostática de un líquido con su misma densidad:

$$P_m = \left(C_1\sqrt{V} + C_2 \cdot K\sqrt{H - C_2\sqrt{V}} \right) \cdot \gamma$$

Donde C_1 es un coeficiente que depende del tamaño y la forma del encofrado (para muros $C_1=1,0$; para columnas $C_1=1,50$); C_2 es un coeficiente que depende de la composición del hormigón (Tabla 7), K es un coeficiente que depende de la temperatura T ($^{\circ}\text{C}$); H es la altura total del encofrado.

$$K = \left(\frac{36}{T + 16} \right)^2$$

Tabla 7. Determinación del coeficiente C_2 en el modelo de CIRIA Report 108 (1985), en base a la norma UNE EN 197-1 (2000)

Grupo	Tipos de cemento	C_2
A	Hormigones sin aditivos con cementos: CEM I, CEM II/A-S y CEM II/A-D Hormigones con cualquier aditivo, sin ser un retardador, con cementos: CEM I, CEM II/A-S y CEM II/A-D	0,30
B	Hormigones con aditivos retardadores de fraguado y cementos: CEM I, CEM II /A-S y CEM II/A-D Hormigones sin aditivos con cementos: CEM II/A-(sin ser S y D), CEM III/A y CEM II/B Hormigones con cualquier aditivo, sin ser un retardador, con cementos: CEM II/A-(sin ser S y D), CEM III/A y CEM II/B	0,45
C	Hormigones con aditivos retardadores de fraguado y cementos: CEM II/A-(sin ser S y D), CEM III/A y CEM II/B Hormigones con o sin aditivos y cementos: CEM III/B, CEM IV y CEM V	0,60

Propuesta de la Société de Difusion des Techniques du Bâtiment et des Travaux Publiques

Por último, también resulta de gran interés **la propuesta de la Société de Diffusion des Techniques du Bâtiment et des Travaux Publiques**. También considera la ley hidrostática hasta alcanzar la presión máxima P_m . En este método se introducen correcciones en función del tipo de cemento, la dosificación de cemento, el espesor a encofrar y la docilidad del hormigón. Las hipótesis son las siguientes:

- Peso específico del hormigón de 24 kN/m^3
- Compactación por vibración interna
- Encofrados sin vibración externa
- No se emplean retardadores

La altura del hormigón fresco se calcula como el producto de la velocidad ascendente del hormigón V por el tiempo de fin de fraguado t_f . La presión máxima no superará 150 kN/m^2 en los pilares. En las losas hay que añadir a la presión hidrostática la sobrecarga de trabajo.

La presión máxima se obtiene de la Tabla 8.

Tabla 8. Presión máxima del hormigón fresco

Temperatura (°C)	Velocidad ascendente del hormigón fresco V	
	$V < 2 \text{ m/h}$	$V \geq 2 \text{ m/h}$
5	$20 + 12,5 V$	$41 + 2 V$
15	$20 + 10,0 V$	$36 + 2 V$
25	$20 + 8,5 V$	$33 + 2 V$

A estos valores de presión se les afecta por los siguientes factores correctores recogidos en las Tablas 9-12:

Tabla 9. Factor corrector por tipo de cemento

Tipo de cemento	C ₁
Portland normal	1,0
Portland con 15% de escorias	1,1
Portland con cenizas de hulla o lignito	1,2

Tabla 10. Factor corrector por dosificación de cemento

Dosificación de cemento (kg/m ³)	C ₂
200	0,80
300	1,00
400	1,37
500	1,62
600	1,80

Tabla 11. Factor corrector por espesor a encofrar

Espesor a encofrar (m)	C ₃
0,10	0,80
0,20	0,93
0,30	1,05
0,40	1,08
0,50	1,10
> 0,60	1,15

Tabla 12. Factor corrector por cono de Abrams

Cono de Abrams (mm)	C ₄
< 80	1,00
90	1,17
100	1,34
110	1,51
120	1,69
130	1,86
140	2,03
150	2,20

El valor de la presión máxima corregida será el siguiente:

$$P_m = P \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4$$

siendo P el valor obtenido de la Tabla 8.

PROBLEMA. Calcular la presión máxima P_m , la profundidad a la que se alcanza P_m/γ y la componente horizontal total F_h del empuje del hormigón fresco por metro lineal de un muro de 5 m de altura, 0,50 m de ancho, de un peso específico $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$, un cono de Abrams de 120 mm, cemento Portland normal, sin retardantes, una temperatura de 15°C y una altura del vibrador interno de 0,50 m para una velocidad de llenado de 3 m/h.

Solución:

	$P_m \text{ (kN/m}^2\text{)}$	$P_m/\gamma \text{ (m)}$	$F_h \text{ (kN/m)}$	% respecto al empuje hidrostático
DIN 18218	65,28	2,72	237,62	79,21
ACI 347-04	68,32	2,85	244,24	81,41
Granulostática	98,28*	-	246,36	82,12
Gardner	60,19	2,51	225,41	75,14
CIRIA R. 108	62,12	2,59	230,16	76,72
Société	78,08	3,25	263,52	87,84

(*) En la teoría granulostática, no se alcanza para 5 m de altura la presión máxima. En la tabla se ha indicado la presión granulostática a la que se llega.

Téngase en cuenta que el empuje horizontal total del hormigón fresco considerando una presión hidrostática sería $F_h = 300,00 \text{ kN/m}$.

PROBLEMA. Se quiere hormigonar el alzado de un muro de 5 m de altura y 10 m de largo de una sola vez. El alzado del muro es constante y mide 50 cm. Se ha usado un cemento Portland con una dosificación de 350 kg/m^3 . El hormigón fresco presenta una consistencia de 120 mm en cono de Abrams y una temperatura de 15°C en el momento de fabricarlo. El peso específico del hormigón utilizado es de $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$ y el tamaño máximo de árido es de 50 mm. Se estima que el muro quedará hormigonado en 2 horas. El encofrado no presenta aislamiento térmico y existe un desplome de 4° respecto a la vertical. Se utiliza un vibrador interno de 1500 W de potencia, siendo la profundidad de vibrado de 50 cm. Calcular el diagrama de presiones sobre el encofrado según las distintas normas y modelos. ¿Cuál es el tiempo de endurecimiento del hormigón? En este caso, ¿qué es limitante, el efecto silo o el efecto del endurecimiento del hormigón? Si se hubiese calculado el empuje según una ley hidrostática, ¿en cuánto se hubiera sobrevalorado el empuje del hormigón fresco en la base inferior del encofrado respecto a los métodos anteriores?

Referencias:

- GALLEGO, E.; FUENTES, J.M.; RAMÍREZ-GÓMEZ, A.; AYUGA, F. (2006). Determinación de las presiones ejercidas por el hormigón fresco en encofrados de gran altura. Ingeniería Civil, 142:101-110.
- GARDNER, N.J. (1985). Pressure of concrete on formwork. A review. ACI Journal, 82(5): 744-753.
- LORENZO, P.J. (2015). Estudio de criterios de diseño y cálculo de encofrados de elementos verticales. Aplicación a varias estructuras. Trabajo Fin de Grado. Universitat Politècnica de València.
- MARTÍ, J.V.; YEPES, V.; GONZÁLEZ, F. (2004). Temas de procedimientos de construcción. Cimbras, andamios y encofrados. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Ref. 2004.441.
- MARTÍN-PALANCA, J. (1982). Presiones del hormigón fresco. Monografía 371 del Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- RICOUARD, M.J. (1980). Encofrados. Cálculo y aplicaciones en edificación y obras civiles. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona.
- SANTILLI, A. (2010). Empuje lateral del hormigón fresco sobre elementos de encofrado vertical: estudio experimental y desarrollo de un modelo empírico. Tesis doctoral. Universidad de Navarra

