

Cálculo de encofrados de gran altura mediante un Modelo de Elementos Finitos: estudio paramétrico

Estimation of lateral pressures formworks by Finite Elements Models: a parametric study

Eutiquio Gallego^(*), José M^a Fuentes^(*), Álvaro Ramirez^(*), Benjamín Navamuel^(**), Francisco Ayuga^(*)

RESUMEN

El presente artículo aborda la determinación de presiones ejercidas por el hormigón fresco sobre encofrados de gran altura, mediante modelos de elementos finitos. La consideración del hormigón como un fluido produce una sobreestimación de las presiones, tanto más importante cuanto mayor sea la altura del encofrado. Por otro lado, las formulas empíricas recogidas en distintas normas de cálculo de encofrados subestiman las presiones en los encofrados de gran altura. El modelo de elementos finitos desarrollado por los autores permite analizar simultáneamente el conjunto formado por el hormigón fresco y el encofrado. Se ha considerado un comportamiento elastoplástico del hormigón, para representar un estado intermedio entre un fluido y un sólido.

La implementación del modelo indicado requiere la definición de ciertos parámetros mecánicos del hormigón fresco, cuya influencia en las presiones ejercidas sobre el encofrado ha sido estudiada en cada caso. Como resultado del estudio paramétrico se ha obtenido que el coeficiente de Poisson (ν), el coeficiente de rozamiento entre el hormigón fresco y el encofrado (μ) y el ángulo de rozamiento interno del hormigón fresco (ϕ) son los parámetros que, en mayor o menor medida, ejercen alguna influencia en las presiones laterales producidas sobre los encofrados.

836-16

Palabras clave: hormigón fresco, Modelo de Elementos Finitos, implementación, encofrado, parámetros.

SUMMARY

This paper deals with the estimation of the lateral pressures exerted by fresh concrete on high-height formwork surfaces by Finite Elements Models. Assuming a behaviour of the concrete similar to a fluid overestimates the pressures, particularly in higher formworks. On the other hand, equations proposed by different international standards can underestimate the pressures when a high formwork is analysed. The Finite Elements Model (FEM) developed by the authors allows a simultaneous study of the fresh concrete and the formwork as a whole. An elasto-plastic behaviour of the concrete has been considered to simulate an intermediate state between a fluid and a solid.

The implementation of a FEM requires knowing the value of some mechanical parameters of the fresh concrete. Their influence on lateral pressures against the formwork surface has been studied for every case. As a result of the parametric analyses, the Poisson's ratio (ν), the coefficient of friction between the fresh concrete and the formwork (μ) and the angle of internal friction of the fresh concrete (ϕ) have been identified as the most influent parameters.

Keywords: fresh concrete, Finite Elements Model, implementation, formwork, parameters.

^(*)Dpto. de Construcción y Vías Rurales, ETS de Ingenieros Agrónomos, Madrid

^(**)ULMA C y E, S. Coop.

Persona de contacto/Corresponding author: francisco.ayuga@upm.es (Francisco Ayuga)

1. INTRODUCCIÓN

Los encofrados desempeñan una función muy importante en las obras de construcción porque permiten la sustentación del hormigón fresco mientras tiene lugar su fraguado. Desde un punto de vista económico, el coste de esta partida representa entre el 40% y el 60% del coste total de la estructura de hormigón (1).

El diseño de los encofrados se efectúa sobre la base de las presiones ejercidas por el hormigón fresco en los elementos que lo contienen. Al objeto de determinar dichos empujes, tradicionalmente se ha asumido que el hormigón fresco presentaba un comportamiento similar al de un fluido, con una distribución de presiones hidrostáticas sobre las paredes del encofrado. Esta simplificación, si bien actúa del lado de la seguridad, conlleva a una sobreestimación de la presión máxima, tanto más importante cuanto mayor sea la altura del encofrado.

Desde una aproximación más acorde con la realidad, el estudio de la interacción existente entre el hormigón fresco y el encofrado debe considerar dos fenómenos. Por un lado, se ha de tener en cuenta el denominado «efecto silo», es decir, la aparición de fuerzas tangenciales a lo largo de la pared del encofrado debido al rozamiento de ésta con el hormigón fresco, lo que induce a una reducción de las presiones laterales. Por otro lado, es preciso considerar la evolución del comportamiento y las propiedades mecánicas del hormigón fresco durante los procesos de fraguado y curado.

Estas consideraciones han sido puestas de manifiesto por diferentes trabajos experimentales de determinación de presiones sobre encofrados (2), (3) y (4), donde las presiones máximas ejercidas por el hormigón fresco son considerablemente inferiores a la presión hidrostática, que se alcanzaría si el hormigón actuase como un fluido perfecto.

Las diferentes normas para el diseño de encofrados desarrolladas en las últimas décadas (5), (6) y (7) tienen en cuenta estos aspectos y establecen ecuaciones empíricas para el cálculo de las presiones ejercidas por el hormigón fresco. Sin embargo, en los encofrados de gran altura (superiores a 5 metros) dichas expresiones subestiman las presiones existentes, lo que puede conducir a la rotura imprevista de los elementos sustentantes (8).

El método de los elementos finitos constituye una herramienta útil para el estudio de estos casos al posibilitar un análisis simultáneo del conjunto formado por el hormigón

fresco y el encofrado. Un aspecto clave en el desarrollo de un modelo de elementos finitos es el modelo de comportamiento seleccionado para la simulación del hormigón fresco. En una etapa inicial, tras efectuarse el vertido del hormigón en el encofrado, el comportamiento de éste se asemeja al de un fluido no newtoniano, y su flujo queda bastante bien descrito tanto por la ecuación de Bingham como por la de Hershey-Bulkley (9). Sin embargo, a medida que avanza el proceso de fraguado de la mezcla, su comportamiento difiere del de un fluido y se aproxima gradualmente al de un sólido. Por esta razón, una teoría de comportamiento elastoplástica resulta apropiada para simular la fase intermedia entre el comportamiento fluido y sólido.

En cualquier caso, e independientemente de cual sea el modelo de comportamiento empleado, la generación del modelo de elementos finitos precisa el conocimiento de parámetros mecánicos de los materiales, cuyos valores condicionan los resultados. El uso de métodos numéricos para la resolución de problemas estructurales es relativamente reciente. Por esta razón, existe poca información acerca de los valores de los parámetros que definen las propiedades mecánicas del hormigón fresco.

En el presente artículo se presenta un modelo numérico de elementos finitos desarrollado por los autores para el cálculo de encofrados de gran altura basado en un comportamiento elastoplástico del hormigón. Asimismo, se analiza la influencia que ejercen los diferentes parámetros mecánicos empleados en la simulación sobre las presiones en las paredes del encofrado, mediante un estudio paramétrico desarrollado al efecto.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Modelo de elementos finitos para el cálculo de encofrados de gran altura

El modelo de elementos finitos desarrollado tiene por objeto la determinación de las presiones que ejerce el hormigón fresco sobre las paredes en encofrados de gran altura (8). Se trata de un modelo bidimensional en el que la geometría del encofrado queda definida por su altura (H), ángulo de inclinación de la pared derecha (α), anchura superior (ASUP) y anchura inferior (AINF), según se muestra en la Figura 1.

La tercera dimensión del encofrado se ha considerado suficientemente grande como para poder asumir la hipótesis de deformación plana.

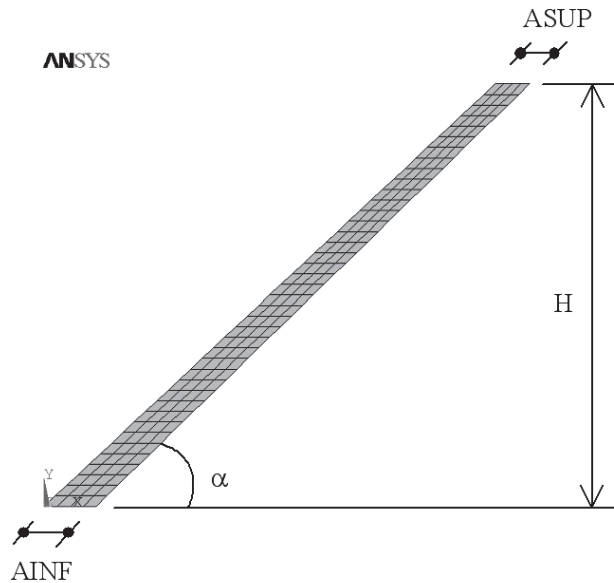


Figura 1. Geometría del modelo de encofrado bidimensional.

La pared del encofrado se ha supuesto rígida, y se ha simulado el rozamiento existente entre ésta y el hormigón fresco mediante el modelo de Coulomb, que requiere conocer el coeficiente de rozamiento entre el encofrado y el hormigón fresco (μ).

La selección del modelo de comportamiento para el hormigón fresco resulta uno de los aspectos esenciales en la generación del modelo de elementos finitos. Según lo indicado, en los primeros instantes del proceso de fraguado del hormigón fresco, éste presenta un comportamiento similar al de un fluido. Se puede considerar, por tanto, que su flujo es el de un fluido no newtoniano y tanto las ecuaciones de Bingham como de Herschey-Bulkley resultan adecuadas para su descripción. Ello requeriría conocer la viscosidad y la tensión límite de fluencia del hormigón fresco, parámetros que han sido determinados por Ferraris y de Larrard para un gran número de mezclas (10).

Sin embargo, según avanza el proceso de fraguado el hormigón fresco adquiere capacidad resistente y consistencia, aproximándose sus propiedades progresivamente a las de un sólido y alejándose de su comportamiento como un fluido no newtoniano. De este modo, para las velocidades de hormigonado habituales (1-2 m/h) y encofrados de pequeña altura (inferior a 2 metros) podría asumirse sin excesivo error que el comportamiento del hormigón vertido se asemeja a un fluido. Sin embargo, en el encofrado de elementos de gran altura (5-10 metros) la afirmación anterior no es posible porque coexisten masas de hormigón fresco en muy diferentes estados de fraguado. Así, mientras que el hormigón vertido en las zonas superiores del encofrado poseerá un comportamiento fluido, el depositado en la

zona inferior presentará, en cambio, un elevado grado de endurecimiento. Por lo tanto, se ha optado por utilizar un modelo de comportamiento elastoplástico para el hormigón fresco, que permite simular propiedades intermedias entre un fluido y una roca.

El modelo elastoplástico se compone de dos regiones: elástica y plástica. En la región elástica el material ofrece un comportamiento isótropo y lineal de acuerdo con lo expresado por la Ecuación 1. Son necesarios, por lo tanto, dos parámetros mecánicos para la completa definición de la rama elástica: el coeficiente de Poisson del hormigón fresco (ν) y el módulo de elasticidad del mismo (E), a partir de los cuales se obtienen las constantes elásticas de Lamé (λ , μ).

$$T_{ij} = \lambda \cdot E_{kk} \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \mu \cdot E_{ij} \quad [1]$$

donde:

- T_{ij} : Tensor de tensiones.
- E_{kk} : Módulo de elasticidad
- δ_{ij} : Operador delta de Kronecker.
- λ, μ : Constantes elásticas de Lamé.

En la región plástica, se ha utilizado el criterio de plastificación perfecta de Drucker-Prager (11) expuesto en la ecuación 2, donde α y κ son dos parámetros característicos del material, I_1 es el primer invariante del tensor de tensiones y J_2 es el segundo invariante del tensor desviador de las tensiones. La función F recibe también el nombre de «Función de fluencia», dado que cuando dicha ecuación se satisface se dice que el material ha plastificado y comienza a fluir, lo cual implica que se produzcan grandes deformaciones sin apenas un incremento del estado de tensiones del material.

$$F = \alpha \cdot I_1 + \sqrt{J_2} - \kappa = 0 \quad [2]$$

El criterio de plastificación de Drucker-Prager es realmente una modificación del criterio de Mohr-Coulomb, que se propuso para evitar los problemas en la determinación de la dirección plástica que aparecían en ciertos estados de tensión. Así, el criterio de Drucker-Prager adopta una forma cónica en su representación en el espacio tridimensional de tensiones, lo cual evita por completo el problema expuesto.

Esta aclaración es importante por cuanto los parámetros del material que requiere el modelo de Drucker-Prager (α, κ) se calculan a partir de las propiedades mecánicas derivadas del modelo de Mohr-Coulomb, que son universalmente conocidas: el ángulo de rozamiento interno (ϕ) y la cohesión (c). El programa comercial ANSYS 8.1 (12) precisa la introducción de los valores de los parámetros de Mohr-Coulomb, que son transformados en sus homólogos de Drucker-Prager mediante las ecuaciones correspondientes (13).

Por último, interviene un último parámetro en la completa definición de la región plástica del modelo: el ángulo de dilatancia (ψ). En el ámbito de la teoría del potencial plástico, la dirección de la deformación plástica se obtiene como el gradiente de una función G denominada «Función de Potencial Plástico» (Ecuación 3), siendo λ una función escalar que define la magnitud de la deformación plástica. Si se observa la ecuación 3 resulta inmediato establecer que la dirección de la deformación plástica siempre será normal a la función G .

$$D_{ij}^p = \lambda \cdot \frac{\partial G}{\partial T_i} \quad [3]$$

La existencia de la función de potencial plástico, G , es imprescindible porque aporta el criterio necesario para establecer la relación entre las tensiones y las deformaciones durante la plastificación. Sin embargo, el principal problema estriba en determinar la función matemática que lo representa. En este punto es donde aparecen los conceptos de ángulo de dilatancia y las reglas de flujo, que pueden ser dos: asociada y no asociada. En el primer caso (regla de flujo asociada) la función de potencial plástico (G) se supone idéntica a la función de fluencia (F). Esta afirmación puede parecer arbitraria a primera vista, pero la condición de estabilidad para materiales plásticos de Drucker permite su demostración. En el segundo caso (regla de flujo no asociada) las funciones G y F son distintas (Figura 2). En el modelo de comportamiento considerado se ha supues-

to la existencia de la función del potencial plástico expuesta en la Ecuación 4.

$$G = \beta \cdot I_1 + \sqrt{J_2} - \kappa' = 0 \quad [4]$$

La formulación de las funciones F y G es similar, diferenciándose sólo en sus constantes. Los pares de constantes (α - β y (κ - κ') se calculan con las mismas ecuaciones con una diferencia: el ángulo de dilatancia. Así, el ángulo de rozamiento interno se utiliza para calcular las constantes de la función de fluencia (α, κ). Por el contrario, cuando se pretenden obtener las constantes de la función de potencial plástico (β, κ') se emplean las mismas ecuaciones que antes pero reemplazando el ángulo de rozamiento interno por el ángulo de dilatancia.

De esta forma, cuando $\phi = \psi$ la regla de flujo será asociada, en cuyo caso se obtiene que $\beta = \alpha$ y $\kappa = \kappa'$. Por el contrario, cuando $\psi = \phi$, entonces se obtiene la regla de flujo no asociada que conlleva una menor dilatación plástica, como puede observarse en la Figura 2. El caso límite inferior se produce cuando $\psi = 0$ porque en tal caso $\beta = 0$ y no se produce dilatación plástica ya que la proyección de D^p sobre la dirección del primer invariante del tensor de tensiones, I_1 , es nula. Por lo tanto, serán necesarios tres parámetros para definir completamente la región plástica del modelo de comportamiento: el ángulo de rozamiento interno, la cohesión y el ángulo de dilatancia.

2.2. Determinación de las propiedades mecánicas del hormigón fresco

El modelo de elementos finitos desarrollado requiere el conocimiento del valor numérico de ciertos parámetros mecánicos del hormigón fresco indicados en el apartado anterior: ángulo de rozamiento interno (ϕ), cohesión (c), ángulo de dilatancia (ψ), módulo de elasticidad (E) y coeficiente de Poisson (ν). Para poder efectuar los cálculos necesarios se precisa también introducir el valor del peso específico del hormigón fresco (γ) y el coeficiente de fricción entre este material y la pared del encofrado (μ).

Diferentes investigadores han llevado a cabo trabajos dirigidos a la obtención de estos parámetros. Los primeros ensayos triaxiales para la obtención del ángulo de rozamiento interno y la cohesión en hormigones frescos, según la teoría de Mohr-Coulomb, datan de finales de los años 40 [14]. Trabajos posteriores profundizaron más en el tema teniendo en cuenta aspectos tales como la composición del hormigón, el ratio agua-cemento, la temperatura de fraguado o la consistencia de la mezcla (15-17).

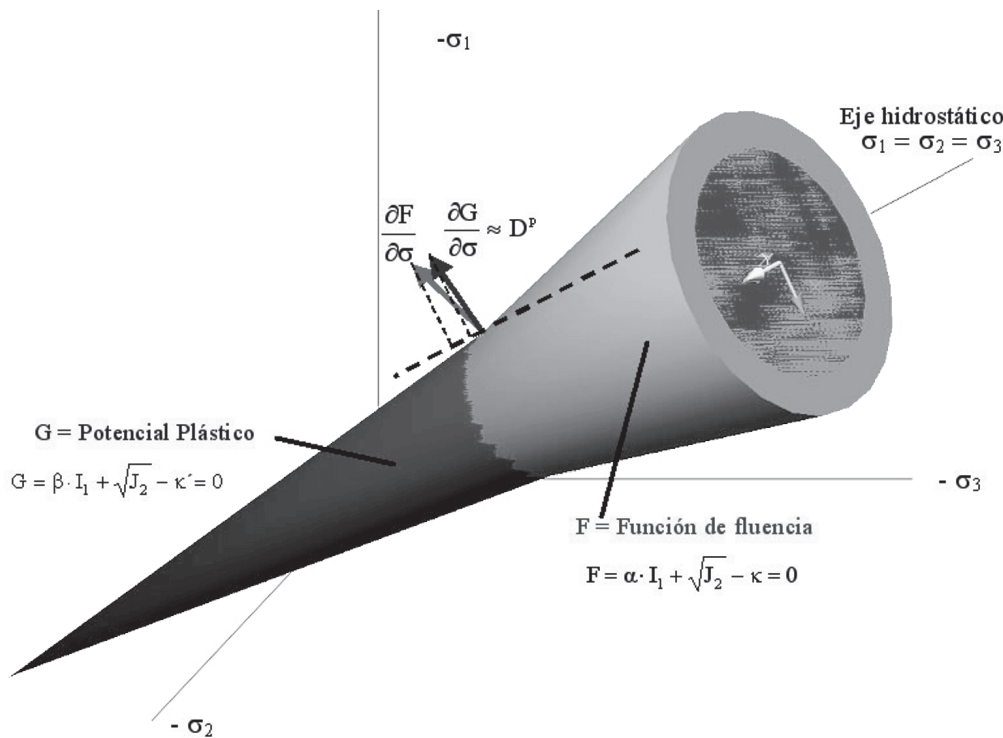


Figura 2. Representación espacial de las funciones de fluencia y potencial plástico del criterio de Drucker-Prager.

Merecen especial consideración los ensayos realizados por Alexandridis y Gardner en la década de los 80 sobre muestras de hormigón fresco a diferentes temperaturas (4-20 °C) y en diferentes estados del proceso de fraguado (40, 80, 120 y 160 minutos). Los resultados obtenidos para el ángulo de rozamiento efectivo se sitúan en el intervalo 34 ° – 41 °, mientras que los valores de la cohesión oscilan entre 2 y 6 kPa.

Los trabajos realizados por Ritchie y Olsen (15-16) demuestran, sin embargo, que el ángulo de rozamiento interno puede alcanzar valores muy inferiores (2-10°) en hormigones frescos con alta dosificación de cemento (relación cemento:árido superior a 1:4).

En cuanto al parámetro mecánico de la dilatación, no se tiene constancia de ningún trabajo experimental para su determinación, a pesar de que Alexandridis y Gardner mencionan su importancia en el comportamiento del material. Dada la ausencia de valores, ha sido necesario estimar su valor para poder ejecutar el modelo. Por ello, se ha adoptado una regla de flujo asociada, de tal forma que el ángulo de dilatación sea igual al ángulo de rozamiento interno. Según se expuso anteriormente, esta hipótesis sitúa el diseño del encofrado del lado de la seguridad.

La definición de la región elástica del material precisa el conocimiento del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson del hormigón fresco. Al igual que ocurre con

los parámetros que caracterizan la región plástica, el valor de estas variables cambia a medida que avanza el proceso de fraguado del hormigón. De este modo, en el estudio paramétrico efectuado se ha considerado un intervalo de variación del coeficiente de Poisson (ν) entre 0,30 y 0,45, valores correspondientes a materiales de muy diferente viscosidad.

Para el módulo de elasticidad del hormigón fresco se ha considerado una horquilla con valores similares a los de un material granular muy disgregado ($E = 2 \cdot 10^3$ kPa) y a un material mucho más compacto ($E = 2 \cdot 10^6$ kPa).

Por último, existen dos parámetros que deben ser especificados para que pueda realizarse el modelo de elementos finitos. El primero es el peso específico del hormigón fresco, para el que se ha adoptado un valor de 19,6 kN/m³, que se corresponde con una densidad de 2.000 kg/m³.

El segundo parámetro que se precisa es el coeficiente de fricción existente entre el hormigón fresco y la pared del encofrado. A este respecto cabe citar los trabajos desarrollados recientemente en el Laboratorio de Reología del CEDEX de Grenoble (18-19), utilizando un aparato de corte directo especial denominado tribómetro, que registra los esfuerzos tangenciales producidos al provocar el deslizamiento del hormigón fresco sobre diferentes superficies encofrantes. El valor del coeficiente de fricción depende de diversas variables como la velocidad de

Tabla 1. Intervalo de variación de los parámetros mecánicos del hormigón fresco considerados en el estudio paramétrico

Parámetro mecánico	Símbolo	Intervalo	Valor de referencia
Angulo de Rozamiento Interno (°)	ϕ	2 – 40	30
Cohesión (kPa)	c	2 – 10	5
Ángulo de dilatación (°)	ψ	2 – 40	30
Módulo de Elasticidad (kPa)	E	$2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^4$
Coefficiente de Poisson	ν	0.30 – 0.45	0.30
Coefficiente de rozamiento Hormigón-Encofrado	μ	0.01 – 0.20	0.05

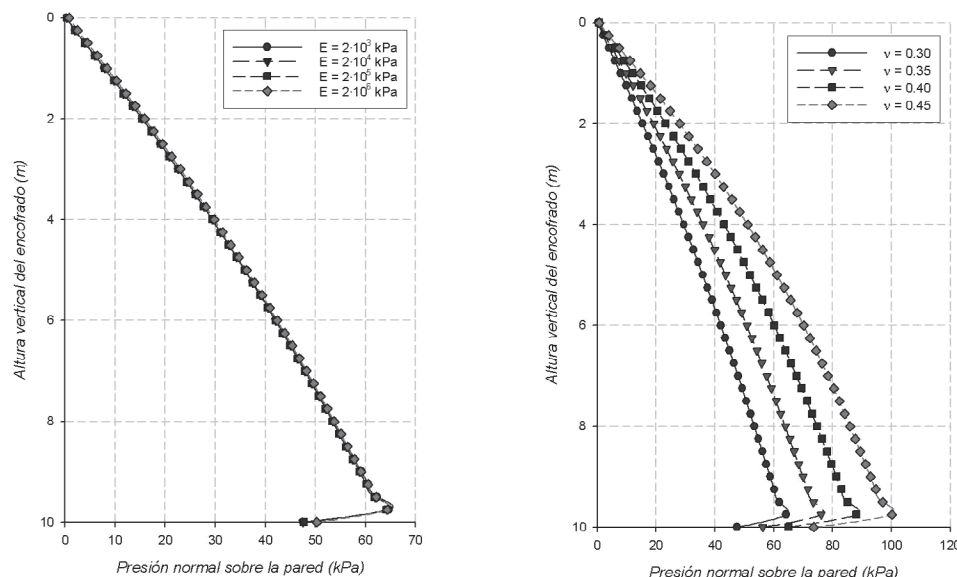


Figura 3. Influencia en las presiones normales ejercidas sobre el encofrado de los parámetros plásticos. a) Módulo de elasticidad. b) Coeficiente de Poisson.

vertido del hormigón, el tipo de mezcla utilizada o el uso de desencofrantes. Por lo tanto, no existe un valor del coeficiente de fricción único para cada material, si bien los trabajos mencionados ofrecen valores del coeficiente de fricción comprendidos en el intervalo 0,01 – 0,20.

3. ESTUDIO PARAMÉTRICO

El modelo de elementos finitos desarrollado permite estudiar conjuntamente el comportamiento del encofrado y el hormigón fresco al simularse la interacción real que se produce entre ambos componentes. Sin embargo, los resultados obtenidos dependen en gran medida del valor de los parámetros mecánicos del hormigón fresco referidos en el apartado anterior. Ello justifica la realización de un estudio paramétrico para

comprobar el grado de influencia de los distintos parámetros sobre las presiones laterales que se producen sobre las paredes del encofrado. El intervalo de valores considerado para cada parámetro (Tabla 1) se ha escogido en función de la información bibliográfica disponible, según lo indicado en el apartado 2.2. En el estudio paramétrico de cada variable se analizarán las presiones laterales resultantes para distintos valores de ésta, manteniendo constante el resto de los parámetros (valor de referencia). La implicación práctica de la regla de flujo asociada obliga en cualquier caso a que el ángulo de rozamiento y el de dilatación deban adoptar el mismo valor.

La geometría considerada en el estudio corresponde a un encofrado vertical de 10 metros de altura (H) y anchura superior (ASUP) e inferior (AINF) iguales, de valor 0,8 m.

3.1. Estudio de los parámetros mecánicos del hormigón en la región elástica

En la Figura 3 se puede observar que el módulo de elasticidad no influye en la distribución de presiones ejercida por el hormigón fresco sobre la pared del encofrado, puesto que las curvas obtenidas son las mismas para todo el rango de valores analizado. El valor máximo de la presión normal es similar en todos los casos, en torno a 65 kPa, y se localiza en la parte baja del encofrado, a una profundidad $H = 9,75$ m.

Por el contrario, el valor del coeficiente de Poisson ejerce gran influencia sobre las presiones laterales, que aumentan conforme lo hace aquél. La Figura 3 permite compro-

bar la influencia de este parámetro, que se deja notar a lo largo de toda la pared vertical del encofrado. La presión máxima registrada en el límite inferior del intervalo analizado ($\nu = 0,30$) es de 64,2 kPa, mientras que esta cifra aumenta hasta 100,2 kPa (56% mayor) cuando el coeficiente de Poisson es $\nu = 0,45$.

3.2. Estudio de los parámetros mecánicos del hormigón en el dominio plástico

Según se comprueba en la Figura 4, ni la cohesión ni el ángulo de dilatación influyen en ningún caso sobre las presiones normales ejercidas por el hormigón fresco sobre el encofrado. Así, en todo el rango de valores estudiado para ambos parámetros la distri-

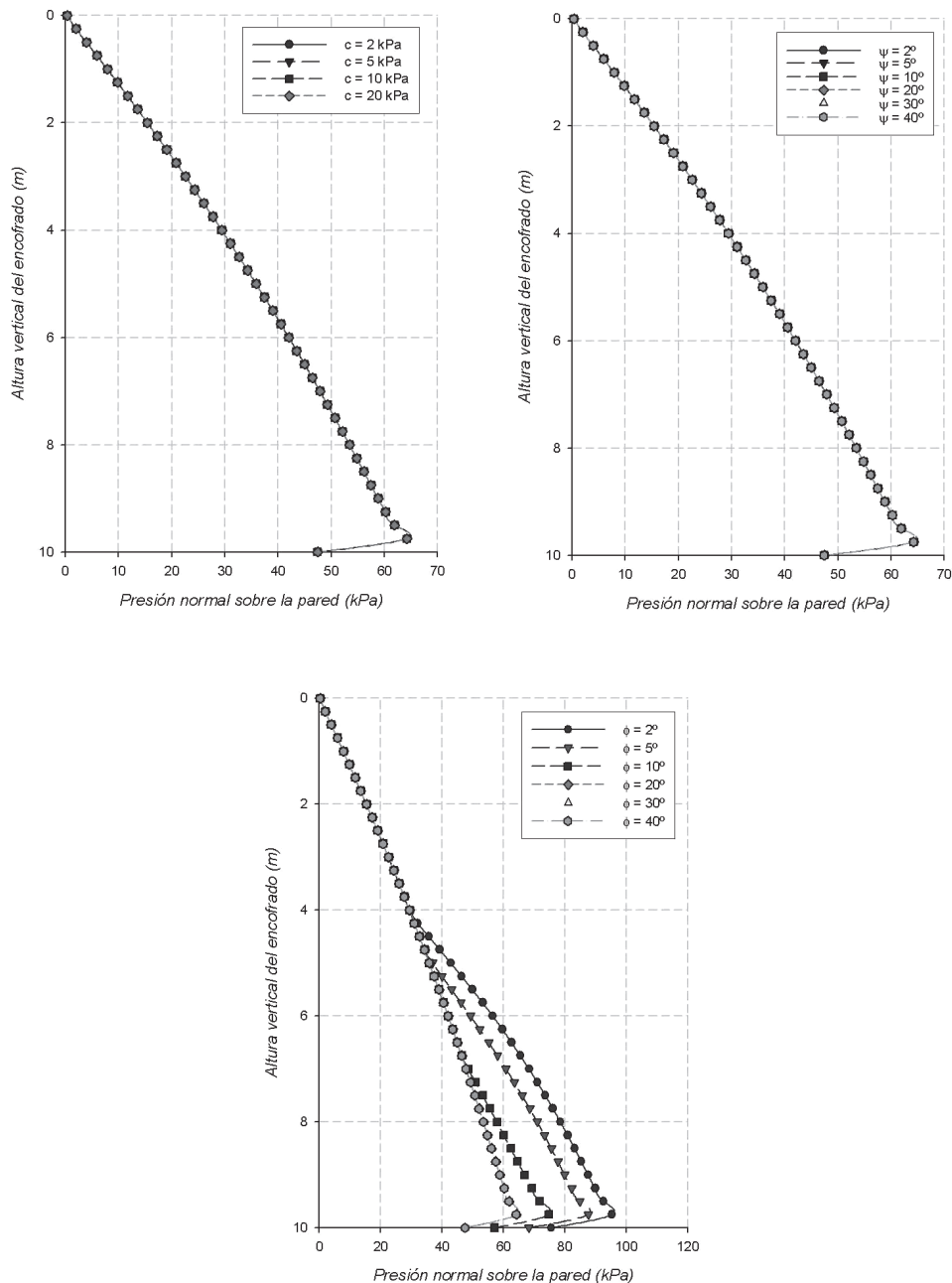


Figura 4. Influencia en las presiones normales ejercidas sobre el encofrado de los parámetros plásticos. a) Cohesión. b) Ángulo de dilatación. c) Ángulo de rozamiento interno.

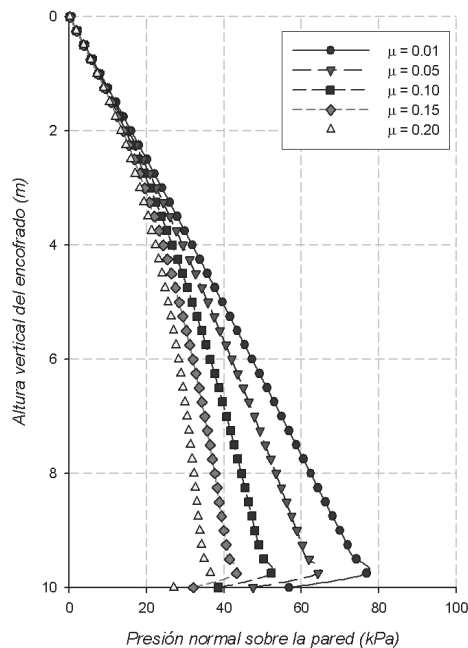


Figura 5. Influencia del coeficiente de rozamiento entre el encofrado y el hormigón fresco en las presiones ejercidas sobre el encofrado.

bución de la presión normal a la pared es idéntica, y su valor máximo se sitúa próximo a 65 kPa.

En cuanto al ángulo de rozamiento interno, no se produce ningún efecto en la distribución de presiones sobre la pared del encofrado hasta una profundidad de 4,25 m. A partir de esa profundidad y hasta el fondo del encofrado se aprecian ciertas diferencias en las curvas de presiones. Cuando el ángulo de rozamiento es inferior a 20°, puede observarse un efecto de éste parámetro sobre la curva de distribución de presiones, produciéndose valores mayores cuanto más pequeño sea el ángulo de rozamiento interno de la mezcla. El valor máximo de la presión (95,30 kPa) se alcanza en el caso límite inferior en que $\phi = 2^\circ$. Por otro lado, si el ángulo de rozamiento interno del hormigón fresco es superior a 20°, no aparecen diferencias en la distribución de presiones sobre la pared y la presión máxima se sitúa nuevamente en torno a 65 kPa. De esta forma, la influencia máxima de este parámetro en los resultados se cifra en 48%, que resulta del aumento de la presión máxima que se produciría desde el caso en que $\phi > 20^\circ$ hasta la situación más desfavorable donde $\phi = 2^\circ$.

Sin embargo, de acuerdo con lo expuesto en el apartado 2.2, en los trabajos experimentales ya citados (15-17) se indican valores del ángulo de rozamiento superiores a 20° para las dosificaciones de hormigón más habituales, por lo que en esos casos este parámetro no ejercerá influencia en las presiones sobre el encofrado (Figura 4).

3.3. Estudio del coeficiente de rozamiento entre el hormigón fresco y el encofrado

La variación del coeficiente de rozamiento entre el hormigón fresco y el encofrado modifica la distribución de las presiones sobre las paredes del encofrado, especialmente a partir de los 2 metros de profundidad (Figura 5). El aumento del coeficiente de rozamiento supone una reducción de los empujes laterales. Así, cuando el coeficiente de rozamiento es $\mu = 0,20$, se obtendría una presión lateral máxima de 36,5 kPa. En cambio, este valor se incrementa hasta 76,9 kPa (111%), cuando el coeficiente de rozamiento adopta un valor $\mu = 0,01$.

4. CONCLUSIONES

La Tabla 2 resume los principales resultados extraídos del estudio paramétrico realizado sobre las propiedades mecánicas del hormigón fresco con un comportamiento elasto-plástico. El trabajo realizado permite comprobar que solamente la variación del coeficiente de Poisson (ν), el coeficiente de rozamiento entre el hormigón fresco y el encofrado (μ) y el ángulo de rozamiento interno (ϕ) alteran las presiones laterales ejercidas sobre el encofrado. Con relación al ángulo de rozamiento interno del hormigón fresco, conviene hacer la aclaración de que este parámetro afecta a las presiones laterales únicamente cuando su valor, ϕ , es inferior a 20°, lo que supone la existencia de una relación cemento:árido alta (1:4 ó superior). El coeficiente de rozamiento entre el hormigón fresco y la pared del encofrado (μ) es el parámetro que puede hacer variar la distribución de presiones en mayor medida, resultando el intervalo de variación de la presión máxima de hasta un 111%.

Por su parte, valores elevados del coeficiente de Poisson ($\nu = 0,45$) dan lugar a las presiones máximas más altas (100,2 kPa). En cualquier caso, este valor representa únicamente un 51% de la presión hidrostática que se alcanzaría suponiendo que el hormigón fresco se comportara como un fluido ($P = \gamma \cdot H = 196$ kPa). Por otro lado, los trabajos experimentales realizados para la determinación de las propiedades mecánicas del hormigón fresco bajo un comportamiento elastoplástico son escasos, y se limitan exclusivamente al estudio de la cohesión y el ángulo de rozamiento interno. En cuanto a los parámetros elásticos requeridos, coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad, se carece de datos publicados que permitan estimar su valor, al igual que ocurre con el ángulo de dilatación en hormigones frescos.

Tabla 2. Influencia de los distintos parámetros mecánicos del hormigón fresco en las presiones laterales máximas previstas

	Parámetros Mecánicos estudiados					
	E	ν	C	ϕ	ψ	μ
Influencia del parámetro	NO	SÍ	NO	SÍ*	NO	SÍ
Intervalo de variación de la presión máxima (kPa)	65	65 - 100.2	65	65 - 95.3	65	36.5-76.9
Incremento máximo (%)	0	56	0	48	0	111

Por lo tanto, serían necesarios estudios experimentales que abordaran la determinación de estos parámetros mecánicos, muy especialmente en lo que se refiere al coefi-

ciente de Poisson, dada la influencia de este parámetro sobre la distribución de las presiones ejercidas por el hormigón fresco sobre las paredes de los encofrados.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Hanna, A.; Senouci, A.: "Material cost minimization of concrete wall forms". *Building and Environment*. Vol. 32, nº. 1 (1997), pp. 57-67.
- (2) Arslan, M.: "Effects of drainer formworks on concrete lateral pressure". *Construction and Building Materials*. Vol. 16, Nº 5 (2002), pp. 253-259.
- (3) Andriamanantsilavo, N. R. y Amziane, S.: "Maturation of fresh cement paste within 1 to 10 m large formworks". *Cement and Concrete Research*. Vol. 34, nº 11 (2004), pp. 2.141-2.152.
- (4) Arslan, M., Simsek, O. y Subasi, S.: "Effects of formwork surface materials on concrete lateral pressure". *Construction and Building Materials*. Vol. 19, nº 4 (2005), pp. 319-325.
- (5) DIN (1980): "Norma DIN-18218. Frishbeton auf lotrechte pressure of concrete on vertical formwork". Berlin: Deutsches Institut für Normung.
- (6) CIRIA (1985): "Concrete pressure on formwork", *CIRIA Report 108*. London: Construction Industry Research and Information Association.
- (7) ACI (2004): "Norma ACI 347-04. Guide to Formwork for Concrete". Farmington Hills: American Concrete Institute.
- (8) Gallego et al.: "Determinación de las presiones ejercidas por el hormigón fresco en encofrados de gran altura". *Ingeniería Civil*, nº 142 (2006), pp. 101-108.
- (9) Tattersall, G.H.: "The Workability of Concrete". *A Viewpoint Publication* (1976). PCA.
- (10) Ferraris, C.F. y de Larrard, F.: "Testing and modeling of fresh concrete rheology". Gaithersburg, Maryland: NISTIR 6094. *Building and Fire Research Laboratory* (1998).
- (11) Drucker, D.C. and Prager, W.: "Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design". *Quart. Appl. Math.* Vol. 10, nº 2. (1952), pp. 157-165.
- (12) ANSYS: "ANSYS User's Manual. Version: 8.1" (2004). Houston: Swanson Analysis Systems, Inc.
- (13) Chen, W.F. y E. Mizuno.: "Nonlinear Analysis in Soil Mechanics". Amsterdam: Elsevier Science (1990).
- (14) L'Hermite, R.: "Vibration and the rheology of freshly mixed concrete". *Revue des Materiaux de Construction*, nº 405 (1949), pp. 179-187.
- (15) Ritchie, A.: "The triaxial testing of fresh concrete". *Magazine of concrete Research*. Vol. 14, nº 40 (1962), pp. 37-41.
- (16) Olsen, R.H.: "Lateral pressure of concrete on formwork". *PhD Thesis* (1968) Oklahoma State University.
- (17) Alexandridis, A. y Gardner, N.J.: "Mechanical behavior of fresh concrete". *Cement & Concrete Research*. Vol. 11, nº 3. (1981), pp. 323-339.
- (18) Djelal, C., Vanhove, Y. y Magnin, A.: "Tribological behaviour of self compacting concrete". *Cement and Concrete Research*. Vol. 34, nº 5 (2004), pp. 821-828.
- (19) Vanhove, Y., Djelal, C., Magnin, A.: "A device for studying fresh concrete friction". *Cement Concrete & Aggregates*. Vol. 26, nº 2 (2005), pp. 35-41.

* * *