

Validación de modelos para el dimensionado de encofrados verticales

Validation of experimental models for fresh concrete lateral pressure

Adrián Santilli¹, Iñigo Puente²

Recibido: Julio 2011

Aceptado: Agosto 2011

Resumen.- El diseño de encofrados verticales depende de la predicción de la presión lateral contra las paredes del mismo, debido a la forma que presenta la envolvente de la presión lateral es difícil poder realizar una validación de los modelos experimentales solamente utilizando parámetros estadísticos. Por lo tanto, este artículo tiene dos objetivos fundamentales, en primer lugar busca explicar por qué cocientes entre datos experimentales y teóricos (E/T) mayores que uno pueden ser aceptados a la hora de validar un modelo, y en segundo lugar cuantificar el máximo cociente E/T que puede ser aceptado en la validación.

Palabras clave: Encofrado; hormigón; presión lateral; validación experimental

Summary.- *The design of vertical formwork is dependent on the lateral pressure predicted to act on the form face; due to the pressure envelope it is difficult to establish a comparison between different methods using only statistical parameters. Therefore, this article has two main objectives, firstly intent to explain why ratios of measured pressure to calculated pressure (E/T) can be accepted to validate a model, and secondly intent to quantify the maximum ratio E/T that can be accepted in the validation.*

Keywords: *Formwork; concrete; lateral pressure; experimental validation*

1. Introducción.- Durante todo proceso constructivo se emplean estructuras temporales denominadas encofrados para poder moldear al hormigón en estado fresco, permitiendo obtener una pieza del tamaño y forma deseada. Los encofrados pueden variar desde estructuras simples hasta otras muy complejas, debiendo estar dimensionadas, para soportar todos los esfuerzos ejercidos por el hormigón en estado fresco, y aquellos producidos durante el proceso constructivo, como por ejemplo: materiales, equipamientos y personal empleado en el mismo. Hurd [1] establece que los objetivos a la hora de dimensionar tanto los encofrados como sus elementos soporte deben ser: seguridad, calidad y costo. Se puede afirmar que los dos primeros factores se encuentran íntimamente relacionados y condicionados por el tercero, ya que la economía de la construcción hace disminuir los coeficientes de seguridad.

Para realizar el diseño de encofrados verticales, la presión lateral realizada por el hormigón debe conocerse. La solución más simple es considerar al hormigón fresco como un fluido, considerándose una distribución hidrostática de presión lateral.

¹ Doctor Ingeniero. Facultad de Ingeniería, Universidad de Montevideo. Av. Luis P. Ponce 1307, 11300 Montevideo, Uruguay . asantilli@um.edu.uy

² Doctor Ingeniero Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto de Ingeniería Civil, TECNUN (University of Navarra), Paseo Manuel de Lardizábal 13, 20018 San Sebastián, España

Esta simplificación, acota el valor máximo que puede adquirir la presión lateral real, resolviendo el problema en forma segura sin tener en cuenta el factor económico, debido a que según Gates y Scarpa [2], el coste de fabricación del encofrado es proporcional a la presión lateral de diseño. Por lo tanto, una sobreestimación de la presión lateral trae como resultado un aumento en el coste del encofrado, el cual Hanna y Senouci [3] establecen que puede ascender hasta el 60 por ciento del coste de una construcción, dato que es reafirmado más recientemente por Kopczynski [4]. Por otro lado, el factor económico se ve limitado por otro factor de vital importancia: la seguridad. Una subestimación de la presión realizada puede generar piezas de mala calidad o, en el peor de los casos, el fallo del encofrado.

En la Figura I se muestra la envolvente de presión lateral aceptada en la bibliografía para el hormigón vibrado, y la forma de la curva experimental de diseño para encofrados verticales (CIRIA Report 108 [5], ACI Committee 347 [6] y DIN 18218 [7]). La primera de ellas es una distribución ficticia definida por Hurd [1] utilizando en cada punto el máximo absoluto de presión lateral, mientras que la segunda es una simplificación utilizada por [5-7] para realizar el diseño de encofrados verticales.

En la Figura I, se observa una disminución de la presión lateral con la profundidad la cual es explicada por Harrison [8] y Yu [9] a partir de un proceso que combina la consolidación del hormigón en estado fresco dentro del encofrado y el consumo de agua por hidratación del hormigón durante su periodo de inducción. Santilli et al. [10] consideran que es difícil poder realizar una comparación entre los modelos y los datos experimentales utilizando solamente parámetros estadísticos, debido al problema de seguridad que supone que un dato experimental sea mayor que la predicción teórica del modelo.

La igualdad entre la medición experimental (dato real) y la predicción del modelo (presión teórica) es el límite aceptable en término de presión, aunque en términos de empuje lateral puede ser conservador, si se acepta como válida la envolvente de presión lateral representada en la Figura I. Debido al área de seguridad que se genera en la misma (área comprendida entre las dos curvas). Por lo tanto, cocientes entre presión experimental y teórica ligeramente mayores que 1 pueden ser adecuados en términos de empuje lateral.

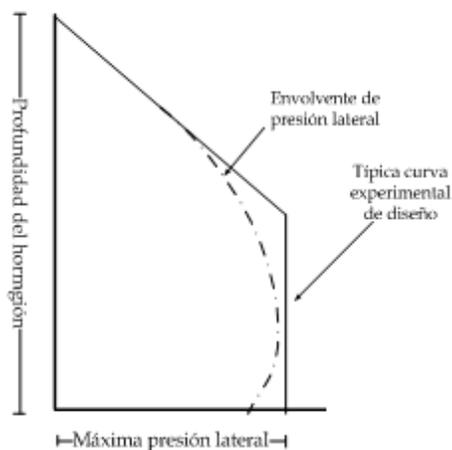


Figura I.- Típica envolvente de presión lateral y curva experimental de diseño

Por otro lado, también debe ser analizado a la hora de validar un modelo experimental el coeficiente de seguridad del encofrado utilizado por ingenieros y constructores en el proceso de diseño.

Este artículo tiene como principal objetivo explicar y cuantificar dichos coeficientes. Para lo cual se va a utilizar, experimentación realizada por los autores y criterios obtenidos de la instrucción española EHE.

2. Coeficiente implícito de seguridad.- Una comparación entre la envolvente de presión lateral y la curva propuesta por los diferentes modelos es la forma más fácil de entender la existencia de este coeficiente implícito de seguridad. La realización de este análisis se muestra en la Figura II.

La Figura IIa es conservadora aunque presenta un dato experimental igual a la presión lateral que se obtienen al aplicar un modelo, límite aceptable en términos de presión, pero en términos de empuje lateral se está agregando un área de incremento de seguridad a la envolvente de presión lateral real realizada por el hormigón. En base a este análisis, aunque no se ha ejemplificado en la Figura II, un dato experimental menor a la presión lateral que se obtiene al aplicar el modelo también es conservador en términos de presión y empuje.

Por otro lado, la Figura IIb establece una situación insegura debido a que el valor experimental es mayor a la predicción teórica del modelo. En términos de empuje, el área de incremento de seguridad no es suficiente para compensar el área de reducción de seguridad.

Por lo tanto, cocientes entre presión experimental y teórica ligeramente mayores que 1 pueden ser adecuados en términos de empuje lateral, debido a que las dos áreas se compensan.

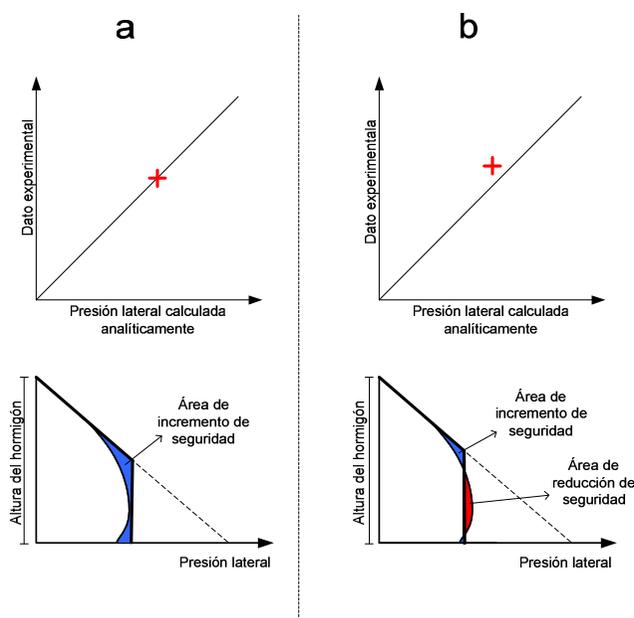


Figura II.- Discusión para el coeficiente entre el dato experimental y el teórico sobre el diagrama de presión lateral

2.1. Dispositivo experimental.- Para poder realizar una estimación de este coeficiente implícito de seguridad se ha realizado un trabajo de experimentación. En total se hicieron 10 ensayos, donde se utilizaron los encofrados LGR (encofrados cuadrados de 50 y 30 cm de lado) y CLR (encofrados circulares e 35 y 60 cm de diámetro) de la empresa ULMA, todos ellos de 3 m de altura.

En todos los casos la velocidad de llenado fue de 12 m/hr y el hormigón fue vertido en 3 tongadas de un metro de altura, las cuales posteriormente fueron vibradas para su correcta consolidación.

La presión lateral realizada por el hormigón fue determinada a partir de 4 sensores de presión montados a 100, 360, 650 y 1120 mm desde la base del encofrado. Los sensores Omega PX 102-025GV fueron utilizados debido a su tamaño y rango de presión. En concordancia con lo establecido por Khayat y Assaad [11], los sensores fueron alineados con la cara interior del encofrado para obtener una medición adecuada.

La calibración de los mismos fue realizada por comparación con otro sensor utilizando aire a presión. Posteriormente, se verificó la calibración colocando utilizando una columna de agua como carga de comparación. La diferencia entre ambas calibraciones, en todos los casos fue menor al 2.5 %, lo que se consideró aceptable.

Si bien se pretende determinar la máxima presión lateral en cada sensor, se ha almacenado el valor de la misma cada 5 segundos, debido a que no se conoce cuando se produce el máximo.

Para los ensayos se utilizaron dos mezclas de hormigón, ambas realizadas con cemento CEM II/A-M(V-L) 42.5R en base a la norma UNE EN 197-1(2000). En todos los casos la mezcla contenía 330 kg de cemento por m³ y una relación agua/cemento 0.5 en peso. La diferencia entre las mezclas, radica en el cociente entre la arena y la suma total de los agregados.

2.2. Cuantificación del coeficiente implícito de seguridad.- A partir de estos ensayos, se puede realizar una estimación de este coeficiente construyendo la envolvente de presión lateral a partir del máximo absoluto registrado en cada uno de los sensores, extrapolarlo la última pendiente entre el sensor inferior y la base del encofrado.

Debido a que la máxima presión lateral se genera sobre el fondo del encofrado, para cuantificar este coeficiente simplemente va a considerarse la diferencia de área en los 65 cm inferiores del encofrado, entre la envolvente real de la presión lateral y una distribución bilineal, cuya máxima presión lateral coincide con el máximo experimental como se muestra en la Figura III. Se ha considerado solamente esta parte del encofrado, porque en esa altura se han colocado tres sensores de presión lo que permite obtener una buena aproximación a la envolvente real.

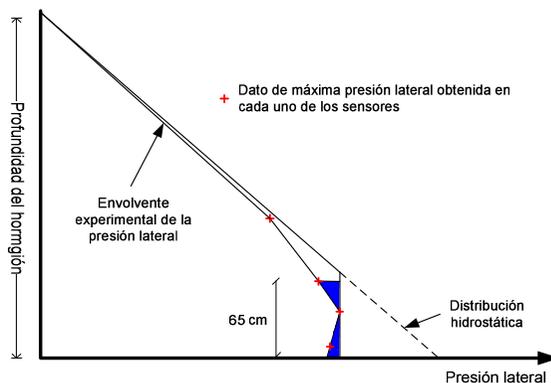


Figura III.- Gráfica de comparación entre la envolvente de presión real y una distribución bilineal para el mismo valor de máxima presión lateral

Los resultados muestran un promedio de diferencias de áreas del 5.8% y una desviación típica del 2.8%. Otro factor de seguridad para tener en cuenta es que el análisis realizado se basa en la envolvente de presión lateral, la cual es una distribución ficticia debido a que los máximos absolutos en cada uno de los sensores no ocurren en el mismo instante de tiempo. El ejemplo más claro es presentado por Douglas et al. [13], los cuales demostraron experimentalmente, para un encofrado de 2 m de ancho y 0,51 m de espesor, que variaciones en la vibración generan una envolvente de presión lateral con significativos cambios en la dirección horizontal.

3. Coeficiente de seguridad del encofrado.- Las normativas ACI Committee 347 [6] y DIN 18218 [7] consideran un coeficiente de seguridad constante para el diseño de encofrados

verticales sin tener en cuenta lo establecido por Sommers [14]: a mayor control de obra, menor es el coeficiente de seguridad a aplicar, y viceversa, a menor control, mayor debe ser el coeficiente.

Una idea similar es reflejada por Randall [15], que consideró que las estructuras presentan diferencias entre el coeficiente de seguridad teórico considerado en el periodo de proyecto y el real. Estableciendo que el coeficiente de seguridad real de una estructura puede ser mayor al proyectado, cuando la construcción es realizada con un alto grado de control. Este concepto es reforzado por Calavera [15], quien relaciona los coeficientes de seguridad con los niveles de control.

La instrucción española EHE adopta valores diferentes para el coeficiente de seguridad, de las acciones en función del nivel de control de la ejecución, por ejemplo para cargas permanentes establece una diferencia del 15% entre control intenso y reducido.

Las normas específicas de diseño de encofrados verticales, no tienen en cuenta diferentes coeficientes de seguridad en función del nivel de control de obra, lo cual puede generar en obra diferentes niveles de seguridad en función del control realizado.

4. Discusión y conclusiones.- En el cuerpo de este artículo se ha demostrado e intentado determinar experimentalmente, la existencia de un coeficiente implícito de seguridad en la validación de un modelo experimental para predecir la presión lateral del hormigón fresco.

Debido a la gran cantidad de variables que influyen en el problema, mayor cantidad de experimentación es necesaria para conocer en mayor medida el valor de este coeficiente.

Posteriormente, se ha planteado una discusión en base a las diferencias entre el coeficiente de seguridad real y teórico considerado en el periodo de proyecto. Lo cual marca una relación entre el nivel de control con el máximo cociente E/T que puede ser aceptado en la validación de un modelo.

En base al análisis realizado, teniendo en cuenta los dos factores, se plantea la posibilidad de poder considerar como válido un modelo para predecir la presión lateral que presente datos experimentales mayores a los teóricos.

5. Referencias

- [1] Hurd, M K. *Formwork for Concrete* 7th Edition. American Concrete Institute, Farmington Hills. 2005. 516 pp.
- [2] Gates, M. y Scarpa, A. *Concreting and Formwork Logistics and Optimization*. Journal of the Construction Division ASCE, 1978: 104(6); 219 – 240.
- [3] Hanna, A S. y Senouci, A. B. *Material Cost Minimization of Concrete Wall Forms*. Building and Environment, 1997: 32(1); 57 – 67.
- [4] Kopczynski, C. *Formwork Efficiencies*. Concrete International, 2008: 30(6); 41 – 43.
- [5] CIRIA Report 108. *Concrete Pressure on Formwork*. London: Construction Industry Research and Information Association, 1985.
- [6] ACI Committee 347. *Guide to Formwork for Concrete*. ACI Structural Journal, 2004.
- [7] DIN 18218. *Frischbeton auf Lotrechte Schalungen (Pressure of Concrete on Vertical Formwork)*, Berlin, Deutsches Institut für Normung, 2010.
- [8] Harrison, T. A. *Pressure on Vertical Formwork when Concrete is Placed in Wide Sections*. Cement and Concrete Association, 1983. 22; 1 – 30.
- [9] Yu, D. N. *Modeling and Predicting Concrete Lateral Pressure on Formwork*. Institute of Construction, Dept. of Civil Engineering, Phd Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, 2000.

- [10] Santilli A, Puente I y López A. *Rate of Placement Discussion for the Validation of Experimental Models of Fresh Concrete Lateral Pressure in Columns*. Construction and Building Materials, 2010; 24(6): 943 – 945.
- [11] Khayat K, Assaad J. Measurement Systems for Determining Formwork Pressure of Highly-Flowable Concrete. Materials and Structures 2008. 41: 37 – 46.
- [12] UNE EN 197-1. Cemento, Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. 2000.
- [13] Douglas B, Saiidi M, Hayes R y Holcomb G. *A Comprehensive Study of the Loads and Pressures Exerted on Wall Forms by the Placement of Concrete*. Report N° 89 – 1, University of Nevada Reno, 1989.
- [14] Sommers P. H. *Better Construction Practices for Greater Formwork Safety*. Concrete International, 1982; 4(5); 31 – 39.
- [15] Randall, J F A. *Historical Notes on Structural Safety*. ACI Journal Proceedings, 1973; 669 – 681.
- [16] Calavera, J. *Cálculo de Estructuras de Hormigón*, Tomo II INTEMAC. Madrid 1999.