

# Presión lateral en columnas: medición experimental

*Lateral Pressure in Columns: Experimental Measurements*

Adrián Santilli<sup>1</sup>; Iñigo Puente<sup>2</sup>

Recibido: julio 2010

Aceptado: septiembre 2010

**Resumen.-** El diseño de los encofrados verticales depende de la predicción en la presión lateral contra la superficie del mismo. Un trabajo experimental en la construcción de 11 columnas de hormigón se ha llevado a cabo con el objetivo de verificar la adecuación de diferentes modelos. La presión ha sido medida en forma directa a partir de la colocación de sensores de presión sobre un panel del encofrado, lo que permite verificar la máxima presión lateral propuesta por los diferentes modelos.

Los resultados reflejan que la predicción de los modelos coincide con la distribución hidrostática de un líquido con la misma densidad que el hormigón, lo cual es generalmente conservativo. Por lo tanto mucho más trabajo es necesario para poder realizar un modelo que sea capaz de predecir la máxima presión lateral a altas velocidades de llenado.

**Palabras clave:** Encofrado; hormigón; Presión lateral.

**Summary.-** The design of vertical formwork is dependent on the lateral pressure predicted to act on the form face. Experimental research into the construction of 11 columns was carried out with the objective of verifying and comparing the adequacy of different theories. Pressure was measured in a direct form using pressure sensors, which permits verify the maximum lateral pressure.

The results shown that the model prediction match with the hydrostatic distribution, being in general conservative, therefore much more research is needed with the objective of determined a model to predict in a better form the lateral pressure realized by fresh concrete, at high placement rates.

**Keywords:** Formwork; Concrete; Lateral pressure.

**1. Introducción.-** Peurifoy y Oberlender [1], definen encofrado como una construcción temporal, la cual es diseñada, para poder moldear el hormigón en estado fresco permitiendo obtener una pieza de tamaño y forma deseada.

La presión realizada por el hormigón sobre el encofrado vertical, es un tema de interés para ingenieros y constructores debido a que una sobreestimación de la misma trae como resultado un aumento en el coste del encofrado, el cual Hurd [2], establece que puede ascender hasta el 60 por ciento del coste de la obra completa de hormigón.

<sup>1</sup> Ing. Civil, Graduado en Universidad de Montevideo. Doctorando: Department of Mechanical Engineering, Institute of Civil Engineering, TECNUN (University of Navarra). [asantilli@tecnun.es](mailto:asantilli@tecnun.es)

<sup>2</sup> Dr. Ing. Department of Mechanical Engineering, Institute of Civil Engineering, TECNUN (University of Navarra), Paseo Manuel de Lardizábal 13, 20018 San Sebastian, Spain. [asantilli@tecnun.es](mailto:asantilli@tecnun.es)

Por el otro lado una subestimación de la presión realizada genera piezas de mala calidad o en el peor de los casos la falla del encofrado, donde entra en juego un aspecto de vital importancia como es la seguridad.

Hurd [2], establece que los objetivos a la hora de dimensionar los encofrados como sus elementos soportes deben ser: seguridad, calidad y costo siendo necesario conocer la presión lateral realizada por el hormigón en estado fresco por parte de ingenieros y constructores para poder cumplir con los mismos.

En la mayoría de los casos el proceso de llenado es a partir de tongadas individuales las cuales son vibradas para su correcta consolidación. Una vez fluidificado la presión que el hormigón realiza sobre el encofrado puede considerarse igual a la hidrostática, realizada por un líquido de su misma densidad.

A medida que se van agregando tongadas Gardner [3], establece que no toda la masa de hormigón se fluidifica debido a que las capas que se encuentra a mayor profundidad no son afectadas por la vibración con lo cual adquieren cierta resistencia al esfuerzo cortante, este fenómeno junto a la fricción lateral con las paredes del encofrado, establecido por Rodin [4] hacen que se generen presiones menores a la hidrostática.

Por lo tanto la presión lateral realizada disminuye a medida que se empieza a formar una estructura cristalina en las capas inferiores, la cual es capaz de soportar esfuerzos verticales.

En la Figura 1 se muestra la envolvente de presión lateral aceptada en la bibliografía para el hormigón vibrado, la típica curva experimental de diseño para encofrados verticales y la distribución hidrostática de un líquido con la misma densidad que el hormigón.

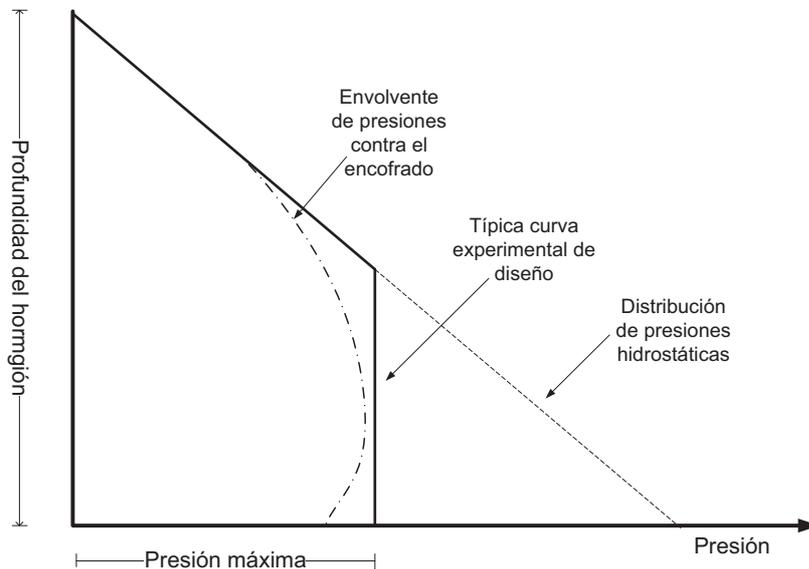


Figura 1.- Típica envolvente de presión lateral y curva experimental de diseño

A lo largo de los años dos formas de resolver el problema han sido desarrolladas: determinar una ecuación empírica a partir de datos experimentales o desarrollar un modelo teórico del problema a partir de propiedades del hormigón en estado fresco.

La gran cantidad de factores relacionados con el hormigón, el encofrado y el método de llenado que influyen en el problema generan modelos muy complejos los cuales no se utilizan en la práctica.

O'Janpa III [5] considero que actualmente elevadas velocidades de llenado (mayores a 10 m/h) son comunes en las construcciones. Por lo tanto, una adecuada ecuación para poder estimar la presión lateral realizada por el hormigón es necesaria. Por otro lado, Santilli et al. [6] marcaron la falta de datos experimentales en columnas para velocidades de llenado mayores a 10 m/h.

Este trabajo presenta la validación de los principales modelos que se encargan de predecir la máxima presión lateral a partir de la toma de datos experimentales a elevadas velocidades de llenado, debido a la falta de validación de los mismos en la bibliografía.

**2. Modelos experimentales-** Actualmente se utilizan métodos empíricos para poder predecir la presión y los problemas surgen cuando los mismos se extrapolan por fuera de los rangos donde hay datos experimentales.

ACI Committee 347 [7] y CIRIA Report 108 [8], dividen los modelos experimentales en los aplicables para paredes o base y columnas, según las dimensiones en planta de las piezas de hormigón.

A continuación se plantean las distribuciones de presiones experimentales mas utilizadas para columnas:

Tradicionalmente se ha considerado que el hormigón fresco posee las características de un fluido, obteniéndose de esta manera, una distribución hidrostática de presiones, sobre las paredes del encofrado.

La normativa Alemana DIN 18218 [9], establece una curva de diseño según la Figura 1, donde el valor de  $P_{max}$ , se expresa en la Ecuación 1, siendo válida para una temperatura de 15° C, un hormigón con peso específico de 25 kN/m<sup>3</sup>, y velocidades de llenado menores a 7,0 m/h.

$$P_{max} = 0,1R + 1. \text{ Hormigón rígido o seco. (Eq. 1a)}$$

$$P_{max} = 0,0R + 9. \text{ Hormigón plástico. (Eq. 1b)}$$

$$P_{max} = 4R + 8. \text{ Hormigón blando. (Eq. 1c)}$$

$$P_{max} = 7R + 7. \text{ Hormigón líquido. (Eq. 1d)}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \_ P_{max}: & \text{ Presión máxima realizada sobre el encofrado (kPa).} \\ \_ R: & \text{ Velocidad de llenado. (m/h).} \end{aligned}$$

La norma establece además que el valor de  $P_{max}$  debe aumentar un 3% por cada ° C, inferior a 15° C, y disminuir un 3% por cada ° C que la temperatura sea superior a 15° C, permitiendo una reducción máxima del 30%. También propone un coeficiente de corrección en función del peso específico de la mezcla.

CIRIA Report 108 [8], propone una curva de diseño según la Figura 1, donde el valor de la presión máxima se determina a partir de la Ecuación 2, en ningún caso mayor que la hidrostática de un líquido con su misma densidad.

$$P_{\max} = \left[ C_1 \sqrt{R} + C_2 K \sqrt{H_1 - C_1 \sqrt{R}} \right] \gamma \quad (\text{Eq. 2})$$

Donde:

- \_  $P_{\max}$ : Presión máxima realizada sobre el encofrado (kPa).
- \_  $C_1$ : Coeficiente que depende del tamaño y la forma del encofrado.
- \_  $C_2$ : Coeficiente que depende de la composición del hormigón.
- \_  $\gamma$ : Peso específico del hormigón. (kN/m<sup>3</sup>).
- \_  $H_1$ : Altura vertical del encofrado. (m).
- \_  $K$ : Coeficiente que depende de la temperatura.
- \_  $R$ : Velocidad de llenado. (m/h).

ACI Committee 347 [7], propone una curva de diseño según la Figura 1, donde la presión máxima se determina a partir de la Ecuación 3. En la cual deben emplearse dos coeficientes de corrección, uno al peso específico de la mezcla ( $C_w$ ), y otro a la composición química y aditivos empleados en la misma ( $C_c$ ).

$$P_{\max} = C_w C_c \left[ 1,2 + \frac{785R}{T + 7,8} \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

En todos los casos la presión máxima debe ser mayor a  $30C_w$  (kPa), pero nunca mayor a la hidrostática realizada por un líquido con igual densidad que el hormigón.

Donde:

- \_  $P_{\max}$ : Presión máxima realizada sobre el encofrado (kPa).
- \_  $R$ : Velocidad de llenado (m/h).
- \_  $T$ : Temperatura del hormigón (° C).
- \_  $C_w$ : Coeficiente por unidad de peso.
- \_  $C_c$ : Coeficiente de composición química.

**3. Dispositivo Experimental.-** Se han realizado un total de 11 ensayos, en todos los casos la velocidad de llenado ha sido de 12 m/h. Los ensayos han sido realizados en una planta de hormigonado con el objetivo de reducir al mínimo el tiempo de espera entre el contacto inicial del agua con el cemento y el vertido dentro del encofrado.

Para los ensayos se han utilizado dos tipos de encofrados diferentes, el encofrado LGR y el encofrado CLR, de la empresa ULMA, todos de 3 m de altura. También se consideraron dos diferentes mezclas de hormigón variando el cociente entre el contenido de arena y la suma total de agregados.

El hormigón ha sido vertido en 3 tongadas de un metro de altura, las cuales posteriormente son vibradas. Los vibradores se sumergen en el hormigón una altura igual a la última tongada para garantizar la correcta consolidación, por un periodo de 30 seg.

**3.1 Encofrados.-** El encofrado LGR, es un sistema para realizar pilares de sección rectangular, principalmente dirigidos al campo de la edificación. Con este tipo de encofrado se puede realizar pilares desde una sección mínima de 25x25 cm hasta una máxima de 50x50 cm pudiendo variar la modulación de 5 en 5 cm. En la Figura 2 se puede observar un pilar LGR montado y asegurado al suelo con tensores.



*Figura 2.- Encofrado LGR*

En los ensayos los encofrados se montaron para dos secciones diferentes, la más grande de 50x50 cm y la pequeña de 30x30 cm.

El sistema de amarre está compuesto por un conjunto de una cuña más un collarín desplazable dentro de la corredera y un bulón de amarre alojado en el interior de la misma.

El encofrado CLR, es un sistema para realizar pilares de sección circular, dirigidos también al campo de la edificación. Los mismos disponen de una gran variedad de diámetros, entre los cuales se encuentran los utilizados durante los ensayos, un pilar pequeño de 35 cm de diámetro y uno más grande de 60 cm de diámetro.

El sistema está basado en moldes metálicos compuestos de dos paneles en forma de media luna, que al unirlos se forma el molde circular.

Para los ensayos se necesitaba una altura de 3 m y para ello hubo que unir dos partes, una inferior de 2 m de altura y otra más pequeña de 1 m de altura.

La unión (tanto horizontal como vertical) de los encofrados CLR se realiza con la ayuda de un cerrojo del tipo CMN, compuesto por un bulón y una cuña. En la Figura 3 se puede observar un pilar CLR montado y asegurado al suelo con tensores.



*Figura 3.- Encofrado CLR*

**3.2 Instrumentación-** La presión lateral realizada por el hormigón ha sido 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 han sido utilizados debido a su tamaño y rango de presión. En la Figura 3, también se puede observar los sensores montados en el encofrado CLR.

En concordancia con lo establecido por Khayat y Assaad [10], los sensores han sido alineados con la cara interior del encofrado para obtener una medición adecuada.

La calibración de los mismos ha sido realizada por comparación con otro sensor utilizando aire a presión. Posteriormente los sensores fueron montados en una columna de PVC de 3.6 m de altura y otra calibración fue realizada utilizando agua como carga de comparación. La diferencia entre ambas calibraciones fue menor al 1.5% en todos los casos lo que se ha considerado aceptable.

**3.3 Mezclas utilizadas.-** Dos diferentes mezclas de hormigón han sido utilizadas en este trabajo, ambas con un cemento CEM II/A-M(V-L) 42.5R en base a la norma UNE-EN 197-1 [11]. En todos los casos el hormigón contenía 330 kg de cemento por metro cúbico y un cociente de agua/cemento de 0.45 en peso.

El tamaño máximo del agregado grueso se ha limitado a 12 mm, para cumplir con la recomendación establecida por Khayat y Assaad [10], los cuales establecen que el diámetro del sensor, 19 mm en este caso, debe ser mayor que el tamaño máximo del agregado.

La diferencia entre las dos mezclas utilizadas, ha sido establecida en el cociente entre el contenido de arena y la suma total de los agregados (A/T), mientras que una mezcla presentaba un cociente igual a 0.7, la otra presentaba un cociente igual a 0.56.

**3.4 Toma de medidas y resultados.-** Si bien se pretende determinar la máxima presión lateral, se ha almacenado el valor de la misma cada 5 segundos, debido a que no se conoce cuando se produce el máximo.

En la Tabla I, se muestran las características de cada ensayo y los resultados de presión lateral máxima, temperatura del hormigón y asiento del cono de Abrams.

Numero de ensayo	Tipo de encofrado	Tamaño del encofrado	Relación de agregados	P <sub>MAX</sub> (kPa)	Temperatura (° C)	Asiento (mm)
1	LGR	30 cm de lado	A/T = 0.56	58.38	17.5	240
2	LGR	30 cm de lado	A/T = 0.7	60.93	11.3	260
3	LGR	50 cm de lado	A/T = 0.56	67.46	12.7	260
4	LGR	50 cm de lado	A/T = 0.56	65.48	12.7	260
5	LGR	50 cm de lado	A/T = 0.56	65.19	16.5	210
6	LGR	50 cm de lado	A/T = 0.7	67.15	15.7	240
7	CLR	Ø 35 cm	A/T = 0.56	62.74	11.7	230
8	CLR	Ø 35 cm	A/T = 0.56	61.14	16.2	220
9	CLR	Ø 35 cm	A/T = 0.7	59.43	16.7	260
10	CLR	Ø 60 cm	A/T = 0.56	68.29	14.9	230
11	CLR	Ø 60 cm	A/T = 0.7	65.20	15.3	220

Tabla I.- Características de los ensayos y resultados

La Figura 4, muestra las tres tongadas de un metro realizadas para completar la totalidad del encofrado, y el tiempo de espera entre dos tongadas consecutivas para garantizar la velocidad de llenado. Los sensores han sido numerados en orden creciente desde la superficie del encofrado.

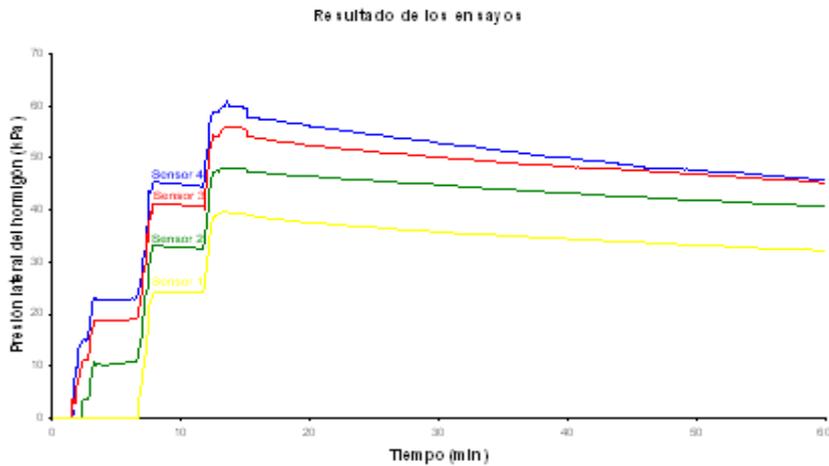


Figura 4.- Resultado obtenido para el ensayo N° 2.

En todos los casos el instante de tiempo en el cual la máxima presión lateral ocurría en cada uno de los sensores no era el mismo. La máxima diferencia registrada fue de 45 seg, lo que establece una variación de la envolvente de presión lateral entre el momento que se origina el máximo absoluto y el vertido es finalizado.

Según Hurd [12], para el diseño de encofrados verticales es importante, la envolvente de la presión lateral, considerándose para determinar la misma, en este trabajo, los máximos absolutos en cada uno de los sensores sin importar el tiempo en el cual ocurran.

Dependiendo del ensayo realizado, dos diferentes envolventes han sido obtenidas, las cuales se muestran en la Figura 5. Una de ellas, presenta el valor de la máxima presión lateral en el segundo sensor, contando desde abajo, como el ensayo N°7. Sin embargo, la otra envolvente

obtenida presenta un aumento de la presión lateral con la profundidad, como el caso del ensayo N°9.

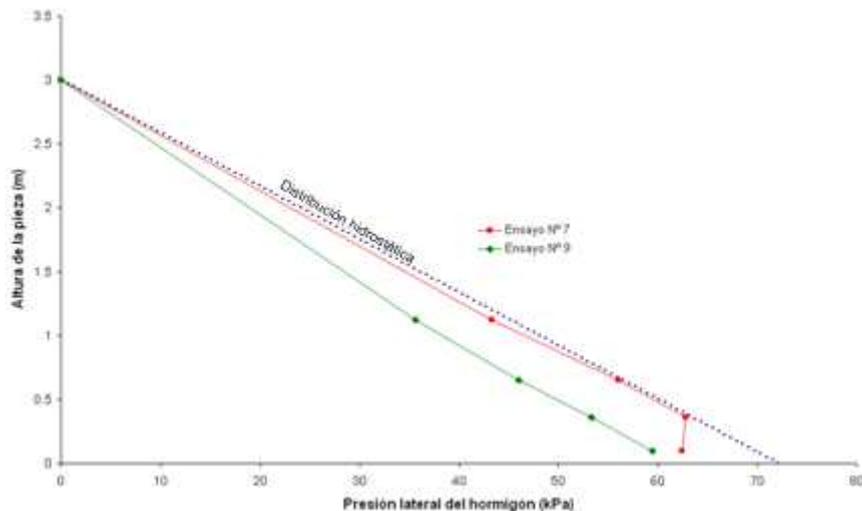


Figura 5.- Tipos de envolventes obtenidas para la presión lateral

La posible razón de las diferencias en la forma de la envolvente, puede ser atribuida a la gran cantidad de factores que influyen en el problema, como por ejemplo la vibración. Debido a que los vibradores pueden estar más cerca o más lejos de los sensores en los diferentes ensayos alterando de esta manera la envolvente de la presión lateral.

**4. Comparación de modelos.**- Los tres modelos considerados ACI Committee 347 [7], CIRIA Report 108 [8] y DIN 18218 [9], en los 11 ensayos realizados tiene una predicción de la máxima presión lateral mayor a la hidrostática de un líquido con la misma densidad del hormigón. Por lo tanto este valor es el que debe ser considerado.

Por ejemplo, si esta cota superior no es tenida en cuenta el modelo propuesto por el ACI Committee 347 [7], predice para los ensayos realizados un valor de máxima presión lateral que varía entre 280 a 330 kPa, lo cual es excesivo frente a los resultados obtenidos.

En todos los casos la máxima presión lateral es menor a la hidrostática de un líquido con la misma densidad que el hormigón.

Lo que es más, la menor presión registrada (ensayo N°1), representa el 81% de la distribución hidrostática. Por otro lado, la media de todos los ensayos representa el 89% del máximo hidrostático. Este resultado es consistente con el establecido en la recopilación realizada por Santilli et al. [6], para velocidades de llenado mayores a 10 m/h.

La principal causa de esta diferencia puede ser atribuida a que durante la vibración de la última tongada no toda la masa de hormigón se fluidifica, debido a que las capas inferiores no se encuentran afectadas por la vibración, por lo tanto, pueden desarrollar resistencia al esfuerzo cortante (ángulo de rozamiento interno y cohesión), disminuyendo de esa manera la máxima presión lateral.

**5. Discusión.**- Los modelos estudiados consideran la máxima presión lateral igual a la hidrostática de un líquido con la misma densidad que el hormigón para los ensayos realizados, lo cual es en general conservativo.

El principal problema de la mala adecuación de los modelos se puede deber a que los tres presentan un crecimiento de la presión lateral lineal con la velocidad de llenado, como se puede observar en las Ecuaciones 1, 2 y 3. De esta forma no se tiene en cuenta la influencia variable de la velocidad de llenado en la máxima presión lateral.

Mientras que una relación lineal es establecida a bajas velocidades de llenado, esta se hace más débil para velocidades mayores.

**6. Conclusiones.-** Del trabajo experimental realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones principales:

1.- La hipótesis de que la presión lateral realizada por el hormigón es igual a la hidrostática de un líquido de su misma densidad es conservativa en el estudio realizado.

2.- La máxima presión lateral propuesta por ACI Committee 347 [7], CIRIA Report 108 [8] y DIN 18218 [9], es en todos los casos mayor a la distribución hidrostática. La principal causa de fallo de estos modelos puede ser la consideración de una influencia lineal de la velocidad de llenado. Lo cual marca la necesidad de realizar un nuevo modelo que sea capaz de predecir la presión lateral de manera mas adecuada, para elevadas velocidades de llenado (mayores a 10 m/hr).

## 7. Referencias

1. Peurifoy R L, Oberlender G D. *Formwork for Concrete Structures*. 3<sup>th</sup> Edition. Construction Series: McGraw - Hill.1995.
2. Hurd, M K. *Formwork for Concrete*.7<sup>th</sup> Edition. American Concrete Institute, Farmington Hills. 2005. 516 pp.
3. Gardner, N J. *Pressure of concrete on Formwork- A review* -. ACI Journal 1985.82(5): 744 – 753.
4. Rodin, S. Pressure of Concrete on Formwork. Institution of Civil Engineers 1952: 709 – 746.
5. O'Janpa III, J V. *Lateral Pressures of Fresh Concrete on Wall Formworks under High Rates of Placement*. Masters Thesis, North Carolina States University 2005.
6. Santilli A, Puente I, 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): 934 – 945.
7. ACI Committee 347. Guide to Formwork for Concrete. ACI Structural Journal. 2004.
8. CIRIA Report 108. Concrete pressure on formwork. London: Construction Industry Research and Information Association. 1985.
9. DIN – 18218. Frishbeton auf lotrechte pressure of concrete on vertical formwork. Berlin. DEUTSCHES INSTITUT FÜF NORMUNG 1980.
10. Khayat K, Assaad J. Measurement Systems for Determining Formwork Pressure of Highly-Flowable Concrete. Materials and Structures 2008. 41: 37 – 46.
11. UNE – EN 197 – 1. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes 2008.
12. Hurd M K. Lateral Pressures for Formwork Design. Concrete International 2007: 31 – 33.