

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE FORMALETAS DE ALUMINIO

Andrés Ocampo^a, Mabel Cuellar^b, Patricia Guerrero^c, José Jaime García^d.

^a Asistente de investigación, Universidad del Valle, Cali Colombia. Ingeniero Civil Universidad del Valle, Cali.

^b Asistente de investigación, Universidad del Valle, Cali Colombia. Ingeniera Civil Universidad del Valle, Cali.

^c Ph.D. in Civil Engineering The University of Michigan, Ann Arbor. MSC in Civil Engineering Georgia Tech, Atlanta. Ingeniera Civil Universidad del Valle, Cali. Profesora Universidad del Valle

^d Ph.D. y MSc. in Mechanics, Michigan State University, M.S.U., Estados Unidos. Ingeniero Mecánico, Universidad del Valle. Profesor Universidad del Valle

RESUMEN

Las formaletas de aluminio con uniones machihembradas son ampliamente utilizadas en Colombia para la construcción masiva de edificaciones de muros de concreto reforzado, ya que son de fácil y rápida instalación y garantizan una fundición monolítica de los elementos. Para asegurar una buena calidad en los acabados y evitar un consumo excesivo de material es necesario controlar las deflexiones de las formaletas durante el vaciado del concreto. Con el objeto de determinar los factores que afectan estas deflexiones se realizaron pruebas de flexión de una sección típica de la formaleta estándar (0.3m x 0.9m) sometida a carga uniforme, cuyos resultados se utilizaron para la calibración de un modelo lineal de elementos finitos desarrollado con el programa comercial ALGOR (Pittsburgh, USA). Con respecto a una formaleta de lámina continua, las formaletas con uniones machihembradas tuvieron una menor rigidez global, pero la inercia de las uniones aumentó la rigidez local y por tanto disminuyó la deflexión máxima. El análisis de los modelos computacionales calibrados se utilizará para la optimización de las configuraciones geométricas del sistema sometido a las cargas reales durante la obra.

ABSTRACT

Aluminum formworks made with tongue and groove joints have been widely used in Colombia for intensive construction of buildings with concrete structural walls, mainly due that they can be easily and rapidly installed and they ensure a monolithic construction of the elements. In order to guarantee good finishing of walls and avoid the excessive consume of material it is necessary to control deflections during casting. With the aim to determine the factors influencing these deflections, bending tests of a typical section of the formwork under constant distributed load (0.3 m x 0.9 m) were undertaken, whose results were used to calibrate a lineal finite element model developed with the commercial program ALGOR (Pittsburgh, USA). With respect to a formwork made with a continuum plate, formworks made with tongue and groove joints showed reduced global stiffness, however, the inertia of the joint increased the local stiffness and reduced maximum deflections. The analyses of the calibrated computational models will be used to optimize the geometrical configurations of the system under real loads.

1. Introducción.

Las formaletas son dispositivos ampliamente utilizados en la industria de la construcción ya que permiten conformar fácilmente diferentes tipos de elementos estructurales. Para su fabricación se utilizan materiales como la madera, el acero y el aluminio.

Las formaletas de aluminio tienen una larga vida útil, son fáciles de construir y son muy livianas, lo que facilita su manejo. Con este tipo de formaleta resulta rentable generar moldes completos de la configuración deseada, de tal forma que el tiempo de ejecución de la obra se reduce considerablemente con respecto a los sistemas tradicionales, además de que se garantiza que los elementos estructurales construidos trabajen monolíticamente.

En consecuencia, la utilización del sistema mejora la relación costo – beneficio del proyecto, debido a que la construcción se convierte en un proceso industrializado, que garantiza mejor calidad y un alto rendimiento¹. En Colombia se producen formaletas de aluminio que presentan una configuración diferente con respecto a las que existen en el mercado mundial, ya que se utilizan conexiones machihembradas para ensamblar la placa que da el acabado al elemento de concreto.

Uno de los problemas mas frecuentes cuando se usan formaletas es el manejo de las deflexiones debidas a la presión generada por el concreto fresco vaciado. Cuando las deflexiones son excesivas hay un mayor consumo de concreto y los acabados son irregulares, lo que se traduce en costos adicionales para el proyecto.

Existen algunos estudios encaminados a optimizar el desempeño de las formaletas de aluminio para reducir deflexiones ², y otros que tienen como objetivo determinar la presión que el concreto ejerce durante el vaciado ³. No obstante, hasta donde conocemos, no se han realizado estudios tendientes a conocer la influencia del machihembrado en el comportamiento mecánico de la formaleta.

El objetivo de este estudio es determinar mediante pruebas experimentales y simulaciones teóricas la influencia de las conexiones machihembradas en el comportamiento de las formaletas tipo muro sometidas a presiones distribuidas como las del concreto, de tal manera que con base en los resultados se pueda simular su comportamiento ante las presiones reales en la obra.

2. Descripción del sistema.

Las formaletas estudiadas confinan el concreto fresco hasta su fraguado para construir los muros. Para conformar el espacio de vaciado se ubican las formaletas de forma paralela y se unen mediante platinas de acero (corbatas). En consecuencia, la presión del concreto fresco se transmite a las caras planas de las formaletas, las cuales están apoyadas en las corbatas, que son las encargadas de garantizar la distancia entre las formaletas y el espesor del muro (Figura 1). Las dimensiones de la formaleta estándar producida en Colombia son de 90 cm x 240 cm.

Una sección representativa de una formaleta (Figura 2) está formada por la placa que hace contacto con el concreto que es el elemento a compresión, más el perfil rigidizador cuya cara externa trabaja a tracción.

Con el fin de conocer el comportamiento de una formaleta de tamaño estándar se estudió una unidad representativa (30 cm x 90 cm) sometida a la presión ejercida por un colchón de aire. Esta es una prueba controlada que se puede repetir en el laboratorio y que permite estimar el comportamiento del sistema ante las cargas reales del concreto.

En este estudio se analizaron tres modelos de formaletas, en uno de ellos el elemento de compresión se construyó con una lámina continua de aluminio (aleación 5052 – H38, espesor 15mm y que se identificará como Lámina). En los otros dos modelos el elemento a compresión estuvo conformado con perfiles extruidos de aluminio (aleaciones 6061 y 6261 temple 6) unidos mediante dos tipos diferentes de machihembrados (Figura 3), identificados como M04 y M06. Se observa que las líneas de machihembrados trabajan como nervios de tal manera que disminuyen las deflexiones locales. Para cada modelo se probaron seis probetas, tres con la lámina de compresión completamente plana y tres con contraflecha. La contraflecha es la deflexión previa (~ 2 mm) que se induce por un proceso de deformación en frío, la cual tiene como objeto disminuir las deflexiones finales del conjunto.



Figura 1. Conformación general del sistema.

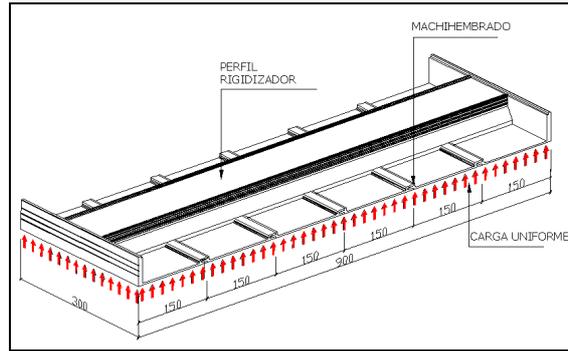
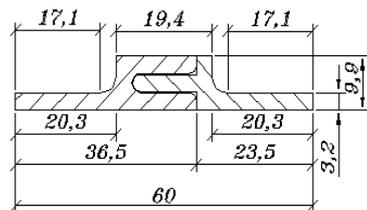
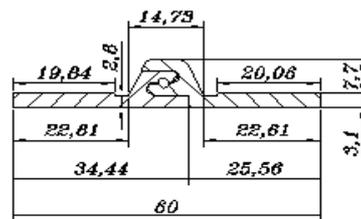


Figura 2. Sección representativa de la formaleta.



(a)



(b)

Figura 3. Modelos de machihembrados: (a) M04 y (b) M06.

3. Ensayo con carga uniforme.

Materiales y métodos experimentales.

En esta prueba se caracterizó una unidad representativa (probeta), consistente en una sección típica de 90 cm de ancho por 30 cm de altura sometida a carga uniforme (Figura 2). Para la aplicación de la carga se fabricó un colchón neumático de dimensiones un poco mayores (100 cm x 40 cm) para garantizar una presión sobre toda la placa de compresión de la probeta. El colchón se ubicó en el espacio libre entre dos probetas, una de las cuales se utilizó como reacción y la otra fue la probeta de ensayo (Figura 4).

Mediante un compresor se hicieron incrementos de presión (manómetro Baurdon Haenni, 0.15 psi de resolución) de 0.6 psi hasta completar 3 psi. Para cada incremento de presión se midieron desplazamientos mediante 7 comparadores de carátula (Mitutoyo, Dial indicator), 5 en zona central y los otros dos en los extremos (Figura 5). Para medir las reacciones la formaleta se apoyó sobre 2 celdas de carga (Figura 6), las cuales fueron fabricadas en nuestro laboratorio. La presión real promedio ejercida por el colchón sobre la formaleta se calculó como la suma de las 2 reacciones dividida por el área de la formaleta (Carga equivalente).

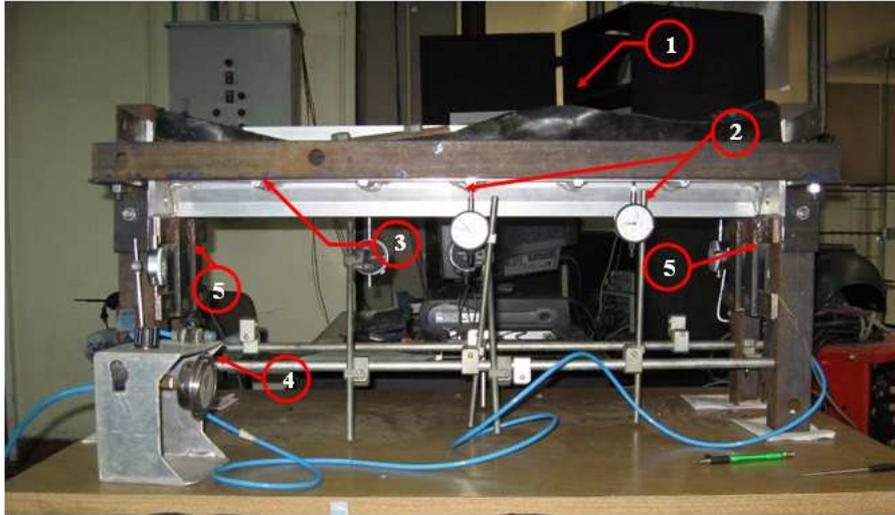


Figura 4. Montaje experimental: (1) Neumático, (2) comparadores de carátula, (3) probeta de ensayo, (4) Manómetro y (5) Celdas de carga.

Para la adquisición de datos se utilizó el Sistema NI PCI 6033E y Sc-2345 (National Instrument, USA) con acondicionadores de señal para las celdas de carga con ganancia de 2.5 V y un computador.

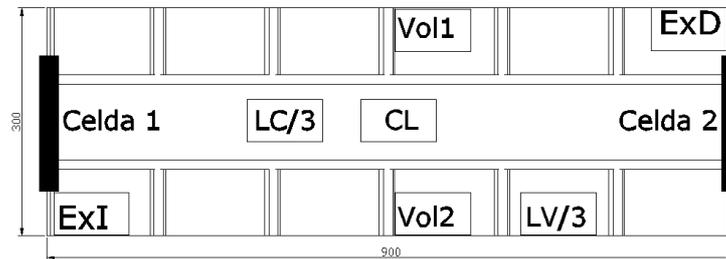


Figura 5. Ubicación e identificación de los indicadores de carátula

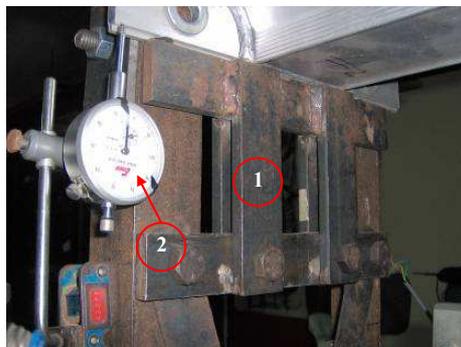


Figura 6. (1) Celda de carga fabricada con $\frac{1}{2}$ puente de Wheatstone, (2) comparador de carátula.

Resultados experimentales.

En las curvas de fuerza de reacción vs. No. de datos adquiridos (Figura 7) se observó un aumento significativo de las reacciones para el primer incremento de

presión (0.6 psi), luego del cual se obtuvieron incrementos de reacción menores. Las reacciones en los dos extremos de las probetas fueron muy similares, con diferencias menores del 3 %, lo cual es consistente con la simetría del montaje.

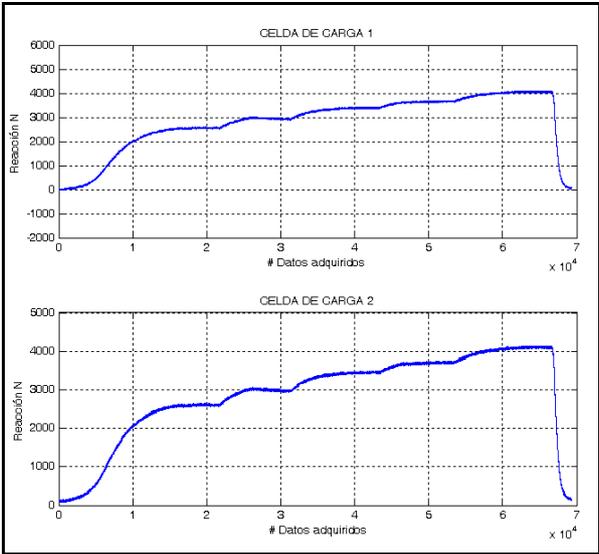


Figura 7. Curva típica de presión Vs. Reacción en las celdas de carga.

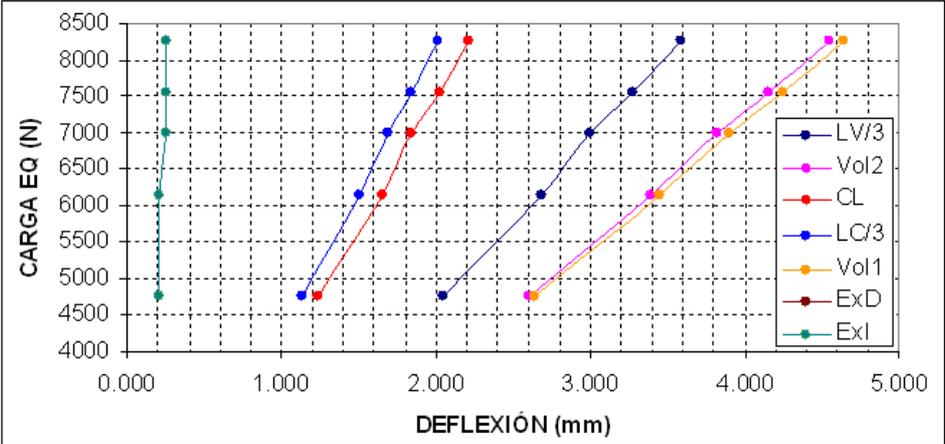


Figura 8. Curva carga equivalente vs. deflexión para formaleta tipo lámina.

Las curvas de carga vs deflexión tuvieron un comportamiento aproximadamente lineal (coeficiente R2 > 0.988) en todos los puntos (Figura 8).

Se observó un aumento pequeño (6.6% en el centro y 3.6% en los bordes) en la rigidez de probetas con contraflecha (CC) respecto a la rigidez de las probetas sin contraflecha (SC) en los modelos de lámina (Figura 9). Por el contrario, la disminución de rigidez fue grande (33.3% en el centro y 35.6% en los bordes) en las probetas CC con respecto a las SC en las formaletas M06 (Figura 9) y moderada (14.21% en el centro y 17.91% en los bordes) en las formaletas M04.

En las formaletas SC, la rigidez en el centro del modelo tipo lámina fue un 13% y 14% mayor, respectivamente, que la rigidez de los tipos M04 y M06 (Figura 10). Esta

diferencia aumentó en las formaletas CC, en las cuales la rigidez en el centro del modelo lámina fue un 29 % y 50% mayor, respectivamente, que la rigidez de las formaletas tipo M04 y M06 (Figura 11).

Para las formaletas SC la rigidez en los voladizos de los modelos con machihembrado M06 y M04 fue un 33.7 % y un 35.5% mayor que la rigidez del modelo lámina. Esta tendencia cambió para las probetas CC ya que en este caso la rigidez del modelo lámina fue un 14.3 % mayor que el modelo M06 y un 22.2 % menor que el modelo M04 (Figura 11). Estos resultados muestran la influencia positiva de los machihembrados para disminuir las deflexiones locales y el efecto negativo de la contraflecha que reduce la rigidez global del conjunto.

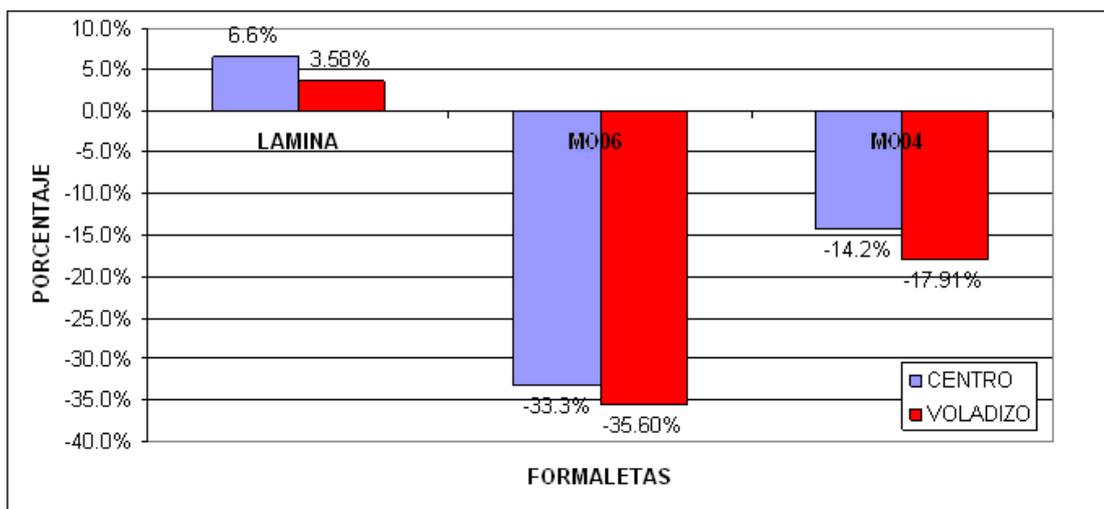


Figura 9. Variación de la rigidez en las formaletas con contraflecha.

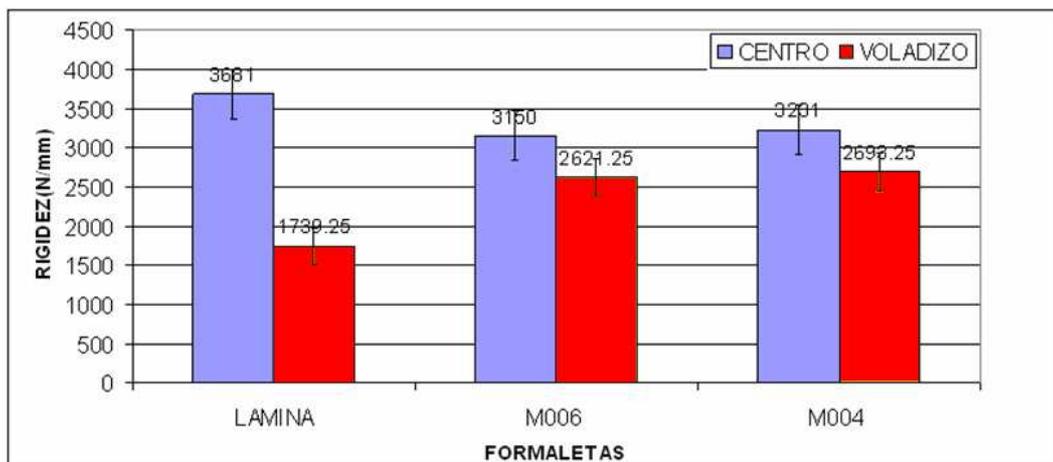


Figura 10. Rigidez en el centro y voladizo de los modelos de formaleta sin contraflecha (SC).

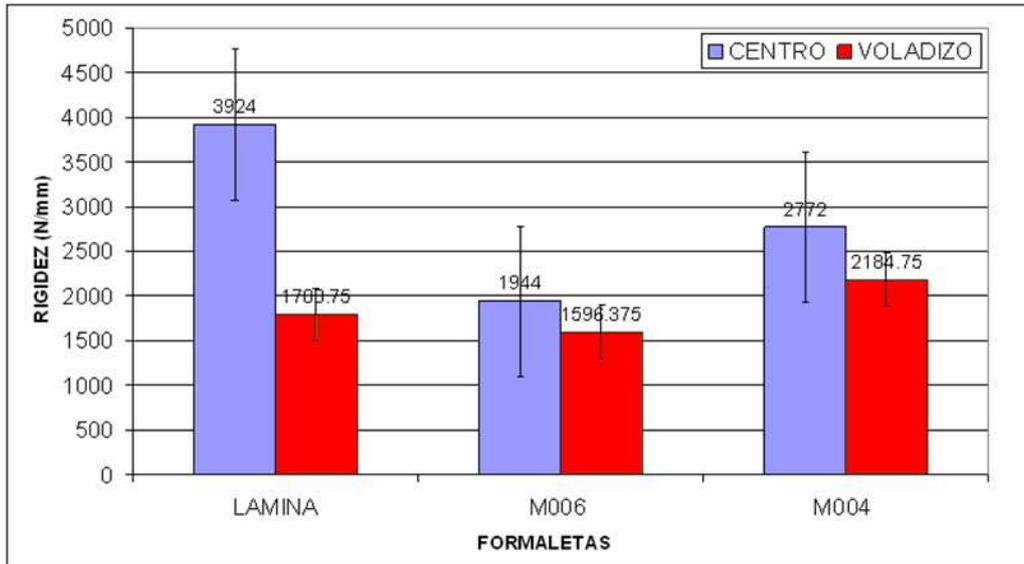


Figura 11. Rigidez en el centro y voladizo de los modelos de formaleta con contraflecha (CC).

4. Modelo de elementos finitos.

Métodos Analíticos.

Con el objeto de calibrar modelos de elementos finitos con los cuales se puedan hacer simulaciones de una formaleta completa sometida a las presiones de concreto se desarrollaron modelos de elementos finitos. Se utilizó el programa ALGOR (V20.02 Pittsburgh, PA 15238-2932 USA) para desarrollar seis modelos (uno CC y otro SC para cada tipo) usando elementos tipo placa para simular el cuerpo de la formaleta, elementos tipo truss en las líneas de contacto sin soldadura entre la placa de compresión y el rigidizador (Figura 12, 13) y elementos tipo gap para simular la separación del machihembrado. Se definió un aluminio aleación 6061 con un módulo de elasticidad de 68000 MPa y una relación de Poisson de 0.33

Las condiciones de borde fueron consistentes con las condiciones del ensayo (Figura 14a). Es decir, se restringieron los desplazamientos en las tres direcciones, X, Y y Z, en uno de los lados y en el lado opuesto se restringieron los desplazamientos en Y y X.

Las formaletas de aluminio presentan separaciones en las uniones machihembradas que son mayores en las probetas CC (rango 0.1 - 0.6 mm) que en las probetas SC (rango 0 - 0.1 mm) las cuales fueron tenidas en cuenta en cada uno de los modelos. Además de esto, se observaron diferencias en la distribución de estas separaciones, que fueron consideradas de una forma aproximada y como discontinuidades tipo 1 y 2 para las SC y tipo 3 y 4 para las CC (Figura 14).

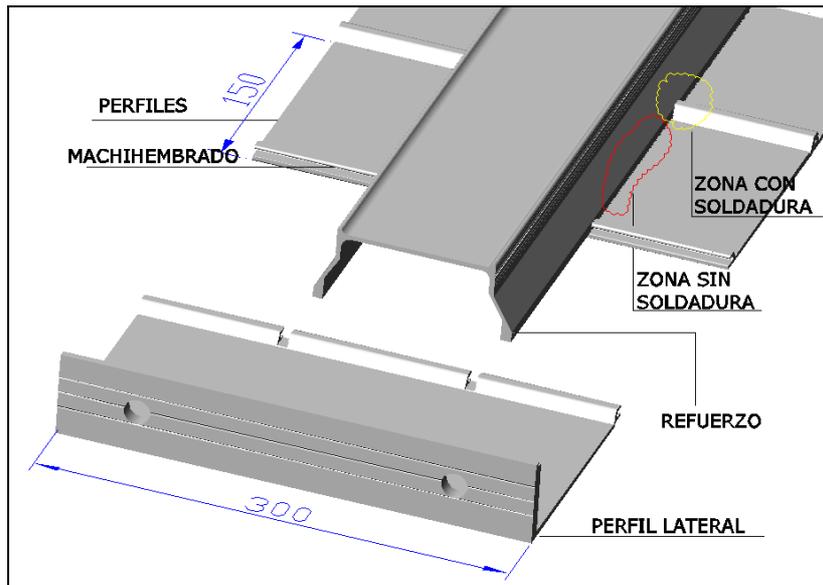
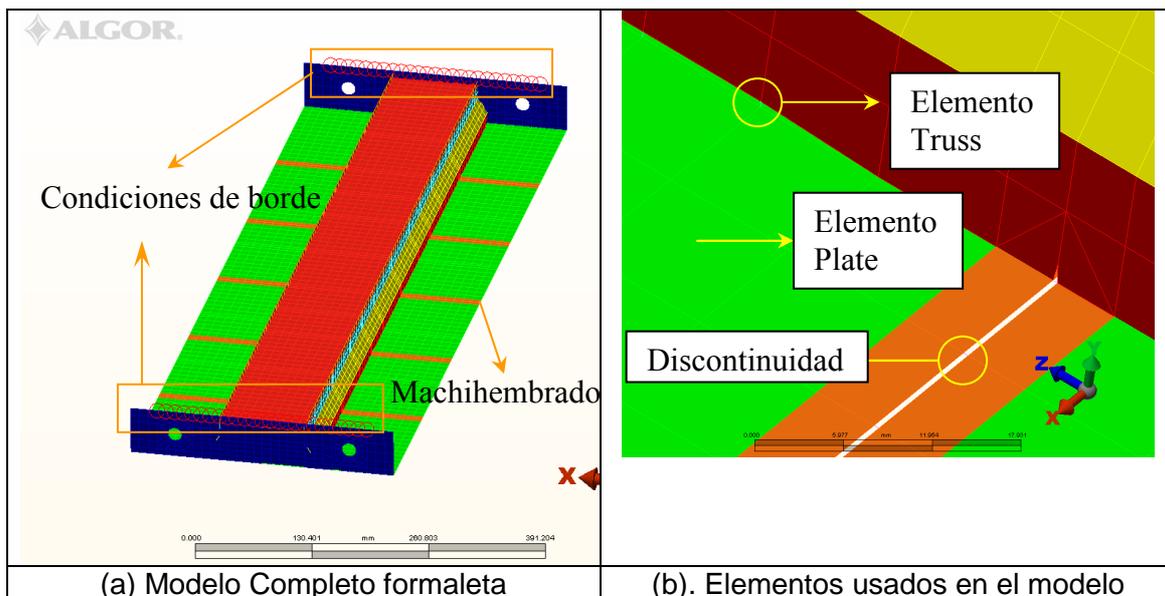


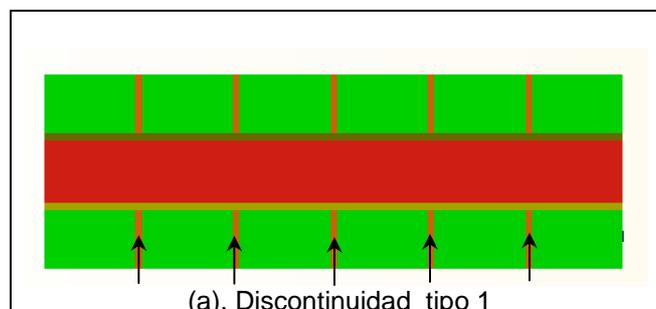
Figura 12. Partes de la probeta.



(a) Modelo Completo formaleta

(b). Elementos usados en el modelo

Figura 13. Modelo analítico de la sección representativa de las formaletas.



(a). Discontinuidad tipo 1

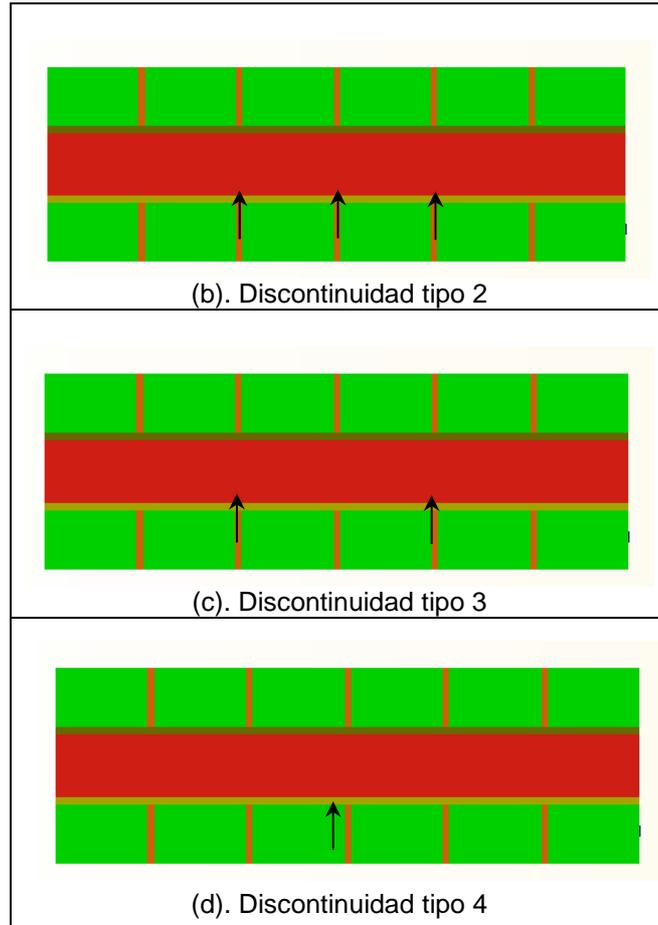


Figura 14. Tipos de discontinuidades implementadas en modelos analíticos.

Para calibrar los modelos computacionales se realizó un procedimiento manual e iterativo mediante el cual se variaron el espesor del machihembrado del machihembrado y el tipo de distribución hasta que el error fue lo más pequeño posible.

La medida de error E utilizada se definió con base en los desplazamientos experimentales (d_e) y los analíticos (d_m) como:

$$E = \sqrt{\frac{\frac{(d_1m - d_1e)^2}{d_1e^2} + \frac{(d_2m - d_2e)^2}{d_2e^2} + \frac{(d_3m - d_3e)^2}{d_3e^2} + \frac{(d_4m - d_4e)^2}{d_4e^2} + \frac{(d_5m - d_5e)^2}{d_5e^2}}{5}} \quad (1)$$

Resultados Analíticos.

Dado que los experimentos con las formaletas tipo lámina sin contraflecha y con contraflecha no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), para la calibración de este modelo se trabajó con el promedio de los resultados de las formaletas de lámina SC y CC.

El porcentaje de error que se obtuvo en la modelación en elementos finitos de los diferentes tipos de formaletas SC y CC con respecto a los resultados experimentales fue inferior a 3.2%, el cual se considera aceptable.

En los contornos de desplazamiento del modelo deformado (Figuras 15, 16) se puede observar la contribución de los machihembrados para reducir la deflexión en los voladizos.

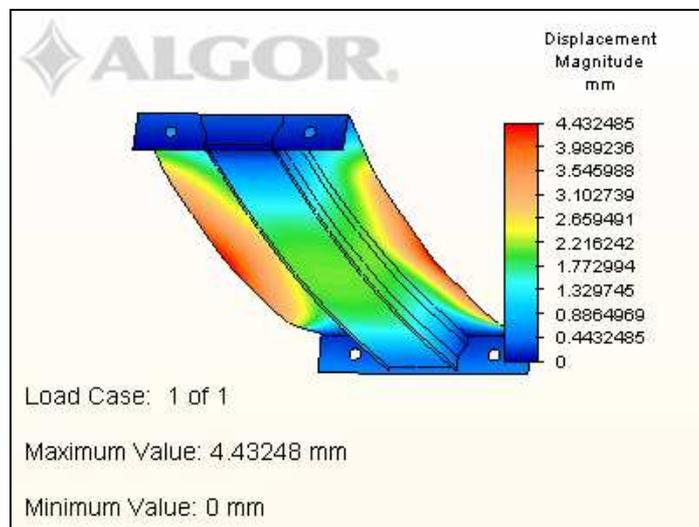


Figura 15. Modelo Formaleta lámina deflexión dirección Y.



Figura 16. Deflexión típica M04 (SC y CC), M06 (SC y CC), dirección Y.

5. Discusión y conclusiones

Se propuso una metodología general para caracterizar el comportamiento mecánico de formaletas utilizadas para la construcción masiva de edificaciones. Con base en una prueba simple de laboratorio complementada con la calibración de modelos lineales de elementos finitos se pueden estimar las deflexiones durante el vaciado de concreto, las cuales son determinantes en la calidad y costo final de la obra.

El comportamiento lineal observado en las curvas de carga equivalente vs deflexión indica que para los niveles de carga alcanzados las formaletas no sufrieron daño y que el ajuste de las placas de compresión en los machihembrados no experimentaron cambios significativos.

En los modelos lámina, las diferencias menores observadas entre la rigidez para las formaletas CC y SC son consistentes con los resultados del modelo de elementos finitos. Para las formaletas con machihembrados, la reducción importante de la rigidez cuando se aplica la contraflecha se puede atribuir al aumento y el cambio en la distribución de la separación de los machihembrados, ya que se reduce la rigidez de la placa de contacto con el concreto que trabaja como el elemento a compresión de una viga. Esta reducción de rigidez fue más notoria en las formaletas con contraflecha debido al aumento del número de separaciones en la placa de compresión.

Las deflexiones del sistema están ocasionadas en parte por la flexión de todo el conjunto como una viga más las deflexiones locales producidas en los sectores de lámina de compresión que están comprendidos entre los rigidizadores. Con respecto a las deflexiones globales el modelo lámina presenta una rigidez un poco mayor que los modelos SC (13%) debido a la continuidad del elemento de compresión. Por el contrario, con respecto a las deflexiones locales se comprobó que los machihembrados trabajan como nervios que ayudan a reducir las deflexiones del conjunto. Para una optimización del sistema se recomienda modificar los procesos constructivos para reducir la separación en las uniones machihembradas, en particular cuando se incluyen las contraflechas.

El comportamiento real de las uniones machihembradas es muy complejo ya que se presenta un fenómeno de ajuste que cambia con el nivel de carga. El modelo lineal propuesto en este estudio reproduce de una manera aproximada el comportamiento de las uniones. No obstante esta simplificación, para los niveles de carga usados se logró una buena calibración de los modelos (errores menores que 3.2%) consistentes con los resultados experimentales. El modelo calibrado puede ser utilizado para realizar simulaciones con otras configuraciones geométricas sometidas a las cargas reales del concreto.

El mejor comportamiento del modelo de machihembrado M04 con respecto al M06 se podría deber al aumento en las superficies de contacto (Figura 3). Con el objeto de tener un mayor entendimiento del diseño de la unión se adelantan actualmente otros estudios con pruebas de flexión y compresión de los machihembrados.

6. Agradecimientos

Este proyecto fue realizado con el auspicio de Colciencias y el apoyo de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle.

7. Referencias.

¹ www.forsa.com, www.cimbras.com.

² Rodrigo Murcia Díaz, optimización de una formaleta de aluminio para fundición de muros de concreto de vivienda, 2003.

³ N. J. Gardner, Pressure of concrete on formwork, ACI journal Tittle no 82-69.

⁴ Tejada Fernando Dominguez, "Laboratory and field study of self-consolidating concrete (scc) formwork pressure- B.S", Universidad Nacional Autónoma de México, 2001- Thesis for the degree Master of Science of Civil Engineering, 2001.

⁵ G. Ovarlez 1, N. Roussel 2, "A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork".

⁶ Rodrigo Murcia Díaz, "Análisis de esfuerzos y optimización de una formaleta de aluminio para fundición de muros de concreto de vivienda". Trabajo de grado Universidad del Valle, 2003.

⁷ J.C. Tchamba a, S. Amziane a, G. Ovarlez b, N. Roussel c, "Lateral stress exerted by fresh cement paste on formwork: Laboratory experiments", 2007.

⁸ Guide to Formwork for Concrete-ACI 347-04.

⁹ Metals Handbook, 2nd Edition, The Materials Information Society.