

CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO UTILIZADAS EN SISTEMAS INDUSTRIALIZADOS DE CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES

Jorge C. DÍAZ ¹, Luisa BAUTISTA ², Adrián SÁNCHEZ ², Daniel RUÍZ ³

RESUMEN

Mediante ensayos de laboratorio se llevó a cabo una caracterización físico - mecánica de los diferentes concretos que se utilizan en los sistemas industrializados de construcción de edificaciones, haciendo un análisis comparativo del comportamiento de este tipo de mezclas a diferentes edades (horas y días). Adicionalmente se contrastaron las principales propiedades mecánicas de estos concretos especiales con las del concreto convencional (bombeable) usado en la construcción de placas de sistemas tradicionales. Por otro lado se llevaron a cabo ensayos de calorimetría sobre los concretos usados en los sistemas industrializados con el fin de relacionar el diferencial máximo de temperatura (T_{max}), tomado del perfil térmico, con la resistencia máxima esperada de la mezcla. Finalmente se desarrolló un prototipo para determinar el esfuerzo de adherencia entre el acero de refuerzo y el concreto con el fin de establecer la evolución de este esfuerzo en el tiempo.

PALABRAS CLAVES

Sistemas industrializados de construcción, ensayos mecánicos de laboratorio, calorimetría, evolución en el tiempo de propiedades mecánicas, esfuerzo de adherencia, concreto

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de sistema industrializado para construcción de vivienda está asociado a los procesos que, mediante una adecuada planeación de actividades y presupuesto y una selección acertada de equipos y materiales, generan elevados rendimientos en obra y un mejor aprovechamiento de los recursos, al crear una especie de producción en serie, similar a los procesos repetitivos empleados en fábricas.

La industrialización de los procesos constructivos permite construir, mediante el uso de formaleta metálica modulada, una unidad de vivienda tipo, con el principio de rotación diaria de la formaleta que permite una velocidad de construcción con eficiente ocupación de personal. Entre los sistemas industrializados más difundidos se encuentra la construcción de vivienda cuyo sistema estructural está conformado únicamente por placas y muros en concreto.

¹ Ingeniero Civil. Director de Desarrollo Técnico. CEMEX Colombia. Email: jorgecamilo.diaz@cemex.com.co

² Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

³ Profesor Asistente e Investigador del grupo de Estructuras. Departamento de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. email: daniel.ruiz@javeriana.edu.co

Dentro de la clasificación de los sistemas industrializados de construcción se encuentran los de formaleta reusable que son paneles metálicos en aluminio o acero que unidos forman una estructura temporal autoportante capaz de resistir presiones sin deformarse y cuyo fin es moldear el concreto según el diseño arquitectónico. En general, este tipo de formaleta se agrupan en dos sistemas: formaletería tipo túnel y formaletería manoportable.

Por otro lado debe mencionarse que debido a la rapidez en la construcción, el concreto usado para este tipo de sistemas debe tener características especiales de resistencia a edades tempranas comparadas con las resistencias máximas de los concretos convencionales bombeables, ya que los sistemas estructurales deben ser capaces de soportar cargas sobrepuestas a edades tempranas de su proceso de fraguado.

2. SISTEMAS INDUSTRIALIZADOS DE VIVIENDA EN CONCRETO

2.1 Tipo túnel

El sistema estructural está conformado por muros y placas macizas en concreto reforzado mediante mallas electrosoldadas de alta resistencia, fundidos monolíticamente en sitio mediante el uso de formaleta de grandes dimensiones en láminas y perfilera de acero que forman semitúneles y se complementan entre sí para conformar la estructura de diseño (Ver Figura 1.) Dentro de las principales características del sistema está el uso necesario de una torre grúa para la movilización de la formaleta y en la mayoría de los casos del concreto.

Asimismo, la utilización de los encofrados en el sistema tipo túnel permite la incorporación de cajas eléctricas y pasos de tubería perfectamente ubicados. Las instalaciones se amarran a la malla y las cajas que se incrustan en los muros. En la placa se colocan cruces prefabricadas para colocar la formaleta de inicio de muro así como las mallas de refuerzo.

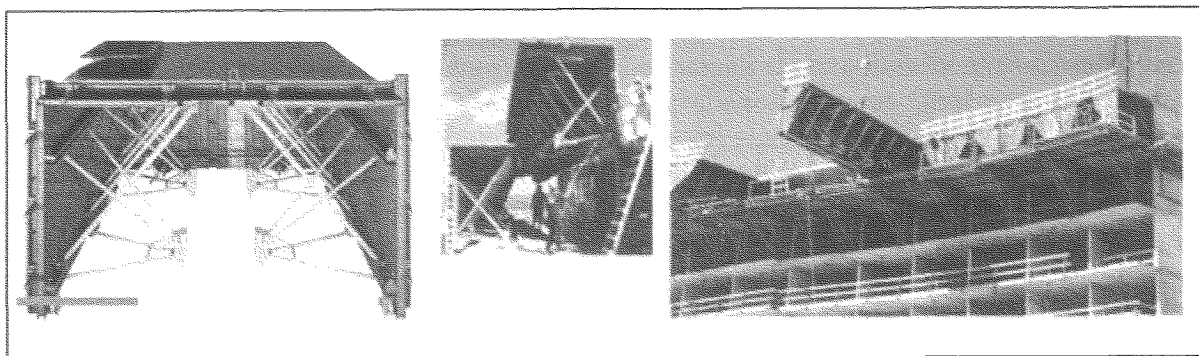


Figura 1. Formaleta para sistema industrializado tipo túnel. [FORSA, 2003]

2.2 Tipo manoportable

Con el sistema manoportable de paneles modulares, la formaleta se puede acoplar fácilmente a cualquier tipo de proyecto o diseño arquitectónico, ya sea para edificios o casas. Dada su fabricación el sistema permite fundir monolíticamente muros y losas logrando un rendimiento de una vivienda diaria. El nivel de

acabado sobre la superficie de concreto puede ser liso o con textura. El sistema de encofrado de la formaleta en aluminio está compuesto por paneles y accesorios. Los paneles son conformados por la unión entre sí de perfiles extruidos con aleación estructural. El peso promedio de un panel de 90cm x 240cm es de aproximadamente 40 kg. (Ver Figura 2)

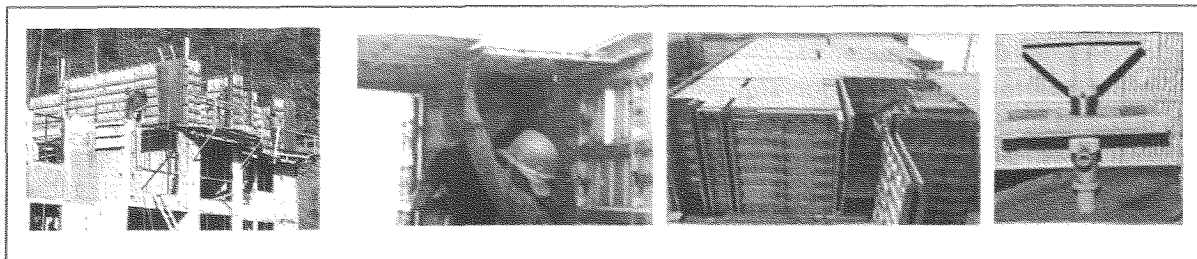


Figura 2. Formaleta para sistema industrializado tipo manoportable. [FORSA, 2003]

3. CONCRETOS UTILIZADOS EN LOS SISTEMAS INDUSTRIALIZADOS DE VIVIENDA DE MUROS DE CONCRETO

En los sistemas industrializados de vivienda de muros de concreto se requieren dos tipos de mezclas dependiendo si son usadas para los muros o para las placas. En particular, los criterios de diseño de las mezclas de concreto usadas para los muros están asociadas con las fluidez y los tiempos de fraguado debido a la alta resistencia al bloqueo que se presenta al interior de los muros (espesores entre 8 y 12 cm) generada por la presencia de tuberías, refuerzos de acero y accesorios. Por su parte la principal característica que se busca en las mezclas usadas en las placas de concreto está asociada con la resistencia a edades tempranas sin perder de vista la fisuración plástica. Las características mencionadas anteriormente han evolucionado desde los primeros años de la década de los 90's cuando se introdujo al país el sistema Outinord y el Contech. En los primeros años de esta década se usaba un único tipo de concreto que cumplía con las características deseables tanto para placas como para los muros. Sin embargo es claro que el uso de una única mezcla de concreto no garantiza un adecuado aprovechamiento de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas, dado que un muro no requiere de tanta resistencia inicial como una placa de concreto y una fluidez muy alta puede alargar los tiempos para poder llevar a cabo el allanado ("finishing") de las placas.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del Concreto usado para muros y placas en sistemas industrializados [CEMEX 2003]

CRITERIO DE DISEÑO	MUROS	PLACAS
Fluidez	Alta	Media
Tamaño máximo del agregado	Grava fina (? 19 mm)	Grava gruesa (? 25 mm)
Resistencia inicial	Media	Alta
Tiempos de fraguado	Acelerado	Acelerado
Resistencia final (f'c)	Min. 21 MPa a los 28 días	Min. 21 MPa a los 28 días
Riesgo de fisuración plástica temprana	Bajo	Alto

El concreto usado en los muros estructurales de sistemas industrializados ha evolucionado desde mezclas fluidas con asentamientos de 7" (17.5 cm) hasta los concretos autocompactantes que no requieren vibrador de inmersión y que garantizan un adecuado llenado en todos los espacios al interior de los muros.

El presente artículo se enfoca en el análisis de los concretos de placas, donde el principal criterio a evaluar es su resistencia a edades tempranas. En este caso su fluidez, medida en el ensayo de asentamiento, es apenas de 4" (10 cm) lo cual requiere el uso de vibradores de inmersión.

Existen varios elementos a tener en cuenta en el diseño de estas mezclas; aunque la calidad del cemento es primordial. De acuerdo con las normas técnicas colombianas NTC121 y 321, se ha encontrado que el cemento más conveniente a usar es el tipo 3, el cual desarrolla altas resistencias a edades tempranas. La composición química del cemento tipo 3 difiere de la del cemento tipo 1 aunque físicamente son similares. No obstante los tamaños de las par-

tículas del cemento tipo 3 son relativamente inferiores a las del tipo 1 debido a que han sido molidas más finamente. Se anota que como medida preventiva para evitar una generación de calor brusca y para evitar grandes gradientes de temperatura entre el concreto fundido y el clima, se recomienda que este tipo de cemento tenga un valor de C3A del 8%.

Otros factores que ayudan a complementar un adecuado diseño, además de criterios básicos como la relación agua/cementante ($a/c+p$), son la inclusión de aditivos y fibras en el concreto, los cuales contribuyen a mejorar el tiempo de manejabilidad, el tiempo de fraguado, la fluidez y la disminución del riesgo de fisuración. Sin embargo, no debe olvidarse que el riesgo de fisuración se disminuye en gran medida cuando se procura controlar los efectos ambientales como las muy altas o bajas temperaturas, baja humedad relativa y la velocidad del viento.

Finalmente se menciona que el concreto de alta resistencia a temprana edad alcanza su resistencia especificada más rápido que un concreto normal. El período en el que obtiene la resistencia especificada puede variar desde unas cuantas horas hasta varios días. Se anota que esta resistencia inicial es especialmente importante porque gobierna el proceso de retiro de la formaleta al siguiente día de fundido el concreto. Para el concreto usado en los sistemas industrializados de construcción, se debe tener en cuenta los esfuerzos de tensión por flexión a edades temprana debido a que, por la velocidad del proceso constructivo, se pueden generar fisuras en las placas, causadas por el peso de las formaletas y el personal que trabaja sobre las placas en las primeras horas después de vaciado el concreto. Debe anotarse que se han presentado en algunas obras de construcción con sistemas industrializados en Bogotá, una serie de fisuras cuyo origen puede estar asociado a solicitaciones a flexión superiores a las disponibles a las pocas horas de vaciado el concreto. Esta solicitud temprana obliga a definir un modelo de análisis estructural basado en criterios de elasticidad.

3.1 Tipos de Concreto Estudiados en la Investigación

A continuación se hará una breve descripción de los concretos estudiados en el presente reporte de la investigación llevada a cabo:

Concreto Outinord: Es un concreto de fluidez media, acelerado de resistencia y fraguado, diseñado especialmente para ser empleado en el sistema túnel, permitiendo una rápida rotación de formaleta y velocidad en la construcción.

Concreto Contech placa: Es un concreto de fluidez media, acelerado de resistencia y fraguado, diseñado para sistemas industrializados de rápida rotación de formaleta y perfectos acabados.

Concreto bombeable: Es un concreto de fluidez media, condición que brinda muy buena manejabilidad, especialmente cohesivo lo cual permite la colocación por medio de un equipo de bombeo. El concreto bombeable es utilizado principalmente en placas aligeradas de estructuras convencionales.

En la tabla 2 se presenta un resumen de las principales características de los concretos descritos anteriormente. Obsérvese que a pesar de que se requieren asentamientos, tamaños máximos, densidades y contenidos de aire iguales, los concretos para sistemas industrializados (Outinord y Contech Placa, requieren resistencias a edades tempranas considerables a diferencia de los requerimientos del concreto convencional.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del Concreto [CEMEX 2003]

CARACTERÍSTICA	MEZCLA DE CONCRETO		
	OUTINORD	CONTECH PLACA	BOMBEABLE CONVENCIONAL
Resistencia inicial especificada	18% - 23% de $f'c$ (14 a 18 horas)	40% - 45% de $f'c$ (a 60 horas)	
Resistencia Final especificada (28 días)	100% de $f'c$	100% de $f'c$	100% de $f'c$
Tamaño máximo nominal de grava	1" (25 mm)	1" (25 mm)	1" (25 mm)
Asentamiento de diseño	$4 \pm 1"$ (10 $\pm$ 25mm)	$4 \pm 1"$ (10 $\pm$ 25mm)	$4 \pm 1"$ (10 $\pm$ 25mm)
Densidad	2.200 a 2.400 kg/m ³	2.200 a 2.400 kg/m ³	2.200 a 2.400 kg/m ³
Contenido de aire	Máximo 3%	Máximo 3%	Máximo 3%

4. DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS

A través de diversos ensayos mecánicos se evaluó el comportamiento de tres mezclas de concreto a edades tempranas (horas iniciales) y a los 28 días para tres resistencias de diseño. Las mezclas estudiadas fueron sometidas a ensayos para determinar la resistencia a la compresión, la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad y el módulo de rotura a diferentes edades. En la tabla 3 se presenta la matriz de mezclas para tres diferentes resistencias de diseño.

Tabla 3. Matriz de mezclas.

Tipo de Concreto	Sistema Constructivo	Asentamiento	Tamaño Máximo Grava	Resistencia (kg/cm ²)		
				175	210	245
Contech Placa	Manoportable	4" (10 mm)	1" (25 mm)	X	X	X
Outinord	Túnel	4" (10 mm)	1" (25 mm)	X	X	X
Bombeable	Convencional	4" (10 mm)	1" (25 mm)	X	X	X

Así mismo se anota que las mezclas estudiadas corresponden a los diseños de mezcla preestablecidas por Cemex Concretos. En cada caso específico se siguieron los lineamientos establecidos en las normas NTC teniendo en cuenta todos los cuidados y criterios para llevar a cabo los ensayos. Adicionalmente las mezclas se curaron debidamente según la Norma NTC 550 [ICONTEC, 2003] "Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra".

Por su parte en la tabla 4 se resumen los ensayos realizados sobre las tres mezclas, especificando en cada caso las edades de los ensayos. Se anota que para cada mezcla estudiada, para cada tipología de ensayo, para cada edad y para cada resistencia, se efectuaron tres ensayos con el fin de tener el mínimo número de probetas estipuladas por las normas técnicas de referencia.

Tabla 4. Matriz de ensayos para cada una de las mezclas estudiadas

EDAD	TIPO DE ENSAYO				
	Resistencia a la Compresión	Módulo de Elasticidad	Tensión Indirecta	Módulo de Rotura	Calorimetria
14 h	Contech Outinord		Contech Outinord	Contech Outinord	Contech Outinord Bombeable
16 h	Contech Outinord	Contech Outinord	Contech Outinord	Contech Outinord	
18 h	Contech Outinord Bombeable		Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	
20 h	Contech Outinord	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord	
24 h	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	
3 d	Contech Outinord Bombeable		Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	
7 d	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	
28 d	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	Contech Outinord Bombeable	

4.1 Ensayo de Resistencia a la Compresión

Siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma NTC 673 [ICONTEC, 2003] "Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto", se llevaron a cabo los ensayos a diferentes edades del concreto. En la figura 3 se muestra el montaje y la falla de probetas sometidas a compresión.

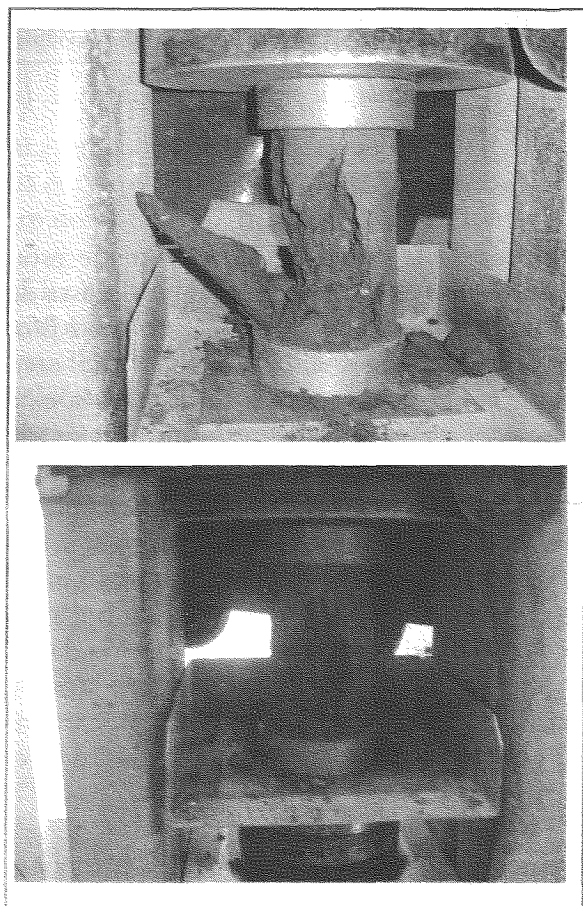


Figura 3. Fallas de cilindros sometidos a compresión

4.2 Ensayo de Resistencia a la Tensión Indirecta

Teniendo en cuenta la Norma NTC 722 [ICONTEC, 2003] "Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto", se efectuaron ensayos de tensión indirecta sobre las tres mezclas estudiadas (Outinord, Contech

Placa y bombeable) para diferentes edades. En la figura 4 se presenta el montaje del ensayo y el modo de falla de algunas probetas.

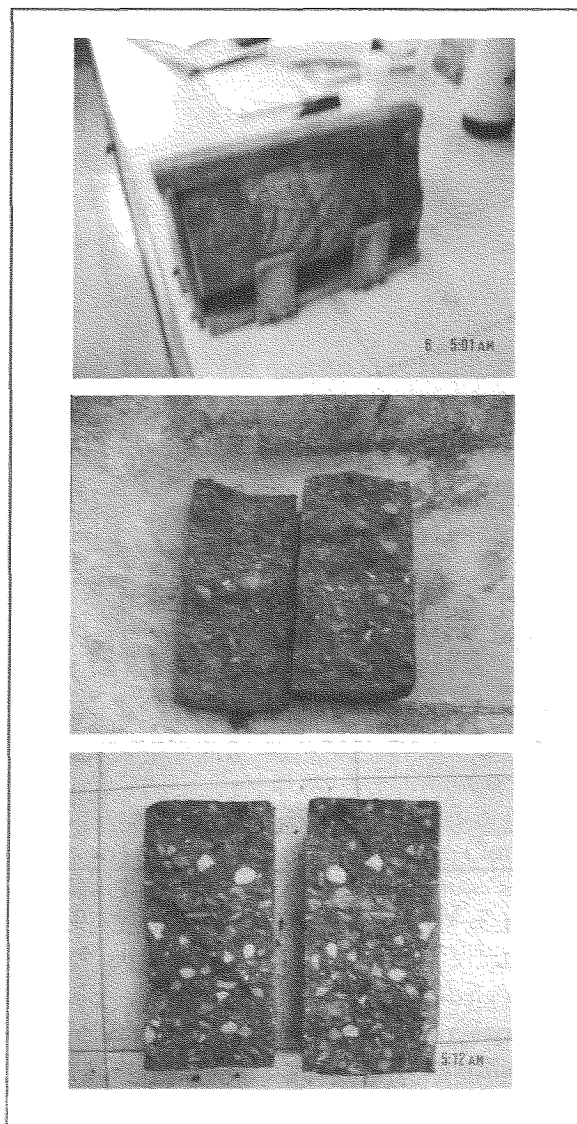


Figura 4. Montaje y falla de cilindros sometidos a tracción indirecta.

4.3 Ensayo de Resistencia a la Flexión

Siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma NTC 2871 [ICONTEC, 2003] "Método de ensayo para determinar el esfuerzo a flexión del concreto utilizando una viga simple con carga en los tercios medios", se determinó la resistencia a la tensión generada por efectos de flexión (módulo de rotura) en el tercio medio de la luz de una viga de concreto simple.

En la Figuras 5 se presenta el montaje y el modo de falla típico de las probetas sometidas a esta sollicitación de carga.

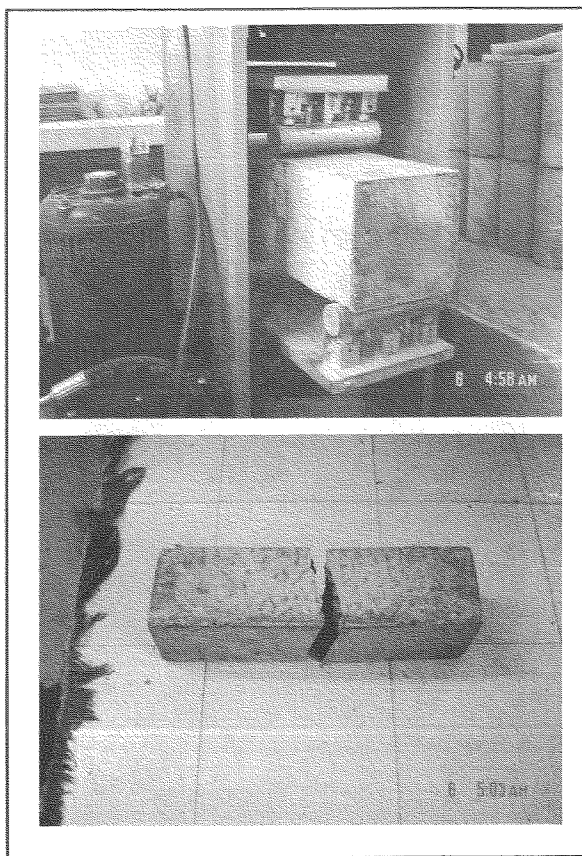


Figura 5. Montaje y falla de una sometida al ensayo para determinar el módulo de rotura

4.4 Ensayo para Determinar el Módulo de Elasticidad

Teniendo en cuenta la Norma NTC 4025 [ICONTEC, 2003] “Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión.”, se estimó el módulo de elasticidad a diferentes edades del concreto para tres mezclas (Outinord, Contech Placa y bombeable). En la Figura 6 se presenta el montaje típico de este ensayo.

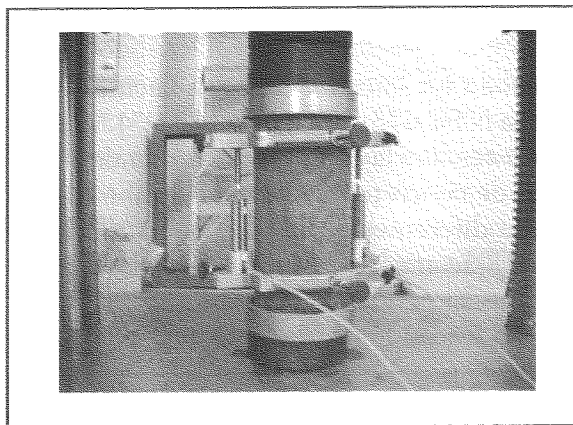


Figura 6. Montaje del ensayo para medición del módulo de elasticidad.

4.5 Ensayo de Calorimetría

A través de la calorimetría se pretende establecer el incremento de calor de una pasta de cemento o una mezcla de concreto en el proceso de hidratación inicial. En el caso del concreto, la calidad intrínseca de la mezcla está relacionada con el proceso de hidratación de los materiales cementantes – cemento, cenizas volantes, humo de sílice o puzolanas contenidos en la mezcla, su relación $(a/c+p)$ y la dosificación de aditivos, que influyen básicamente en la manejabilidad, el tiempo de fraguado de la mezcla de concreto y la evolución de resistencia potencial del concreto. Cada tipo de concreto tiene una calidad intrínseca particular que se refleja, como una huella digital en el perfil térmico.

La medición de la temperatura generada por el proceso de hidratación del cemento, en un ambiente aislado térmicamente, permite establecer con buena precisión las características calorimétricas del concreto. El diferencial máximo de temperatura (ΔT_{max}), tomado del perfil térmico, refleja, de manera precisa y confiable la calidad intrínseca del concreto a edad temprana dentro de las 24 horas siguientes a su vaciado.

Se ha comprobado que existe una correlación directa entre ΔT_{max} y la evolución de resistencia [ASTM, 1998]. Esta relación se puede

utilizar para predecir el rango de evolución de la resistencia. La caracterización calorimétrica del concreto se establece con base en ensayos de obra, de calorimetría y de resistencia a la compresión, que se realizan paralelamente, con el fin de establecer una base de datos.

El modelo de calorimetría [$\Delta T_{\max}$ vs. Resistencia] es producto del análisis de la base de datos mediante técnicas estadísticas y tiene tres componentes paramétricos: el rango de calorimetría, la calidad característica del concreto y el nivel mínimo esperado de la resistencia [ASTM, 1998]. Cada tipo de concreto tiene una calidad característica que está determinada por la relación ($\Delta T_{\max}$ vs. Resistencia) dentro de su rango particular de calorimetría.

El montaje de este ensayo consiste en obtener una muestra de concreto o pasta de mortero para llenar un molde de icopor. Este molde se coloca dentro de otros dos moldes de icopor para garantizar un máximo aislamiento del medio ambiente. (Ver Figura 7). Se introduce en el concreto una termocupla que transmite la temperatura al sistema de adquisición de datos para poder realizar las gráficas correspondientes.

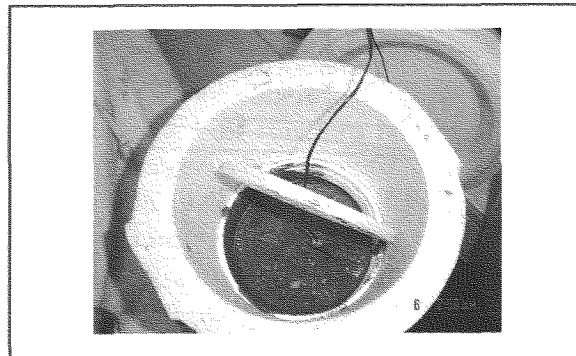
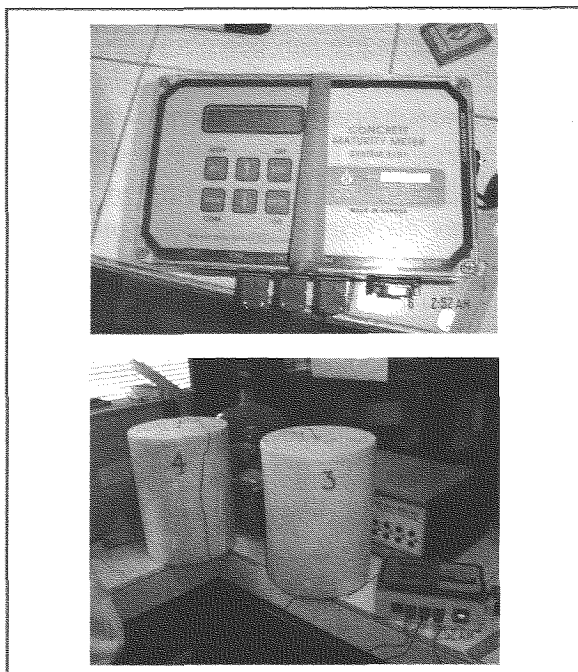


Figura 7. Calorímetro y montaje del ensayo de calorimetría.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Resistencia a la compresión

En la figura 8 se presenta la evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo para las tres mezclas analizadas. En el caso de las mezclas Outinord y Contech, la gráfica presenta un aumento acelerado de la resistencia a la compresión a edades tempranas (entre las 14 y las 24 horas), mientras que a partir del tercer día la tasa de aumento disminuye notablemente presentando un crecimiento relativamente estable. A la edad de tres días para el concreto Contech Placa y el concreto Outinord, la resistencia obtenida de los ensayos es mayor, en promedio, a la resistencia de diseño en un 42% y un 33% respectivamente, lo cual permite garantizar que el concreto trabaja con su resistencia de diseño antes de lo estipulado. Debe anotarse que tanto el concreto Outinord como el concreto Contech presentan resistencias a la compresión a los 28 días sustancialmente superiores a las resistencias de diseño (casi el doble).

Por otro lado el concreto Bombeable no presenta un aumento acelerado de su resistencia a edades tempranas como el descrito anteriormente, aunque a los 28 días llega a valores de resistencia a la compresión superiores a los establecidos inicialmente.

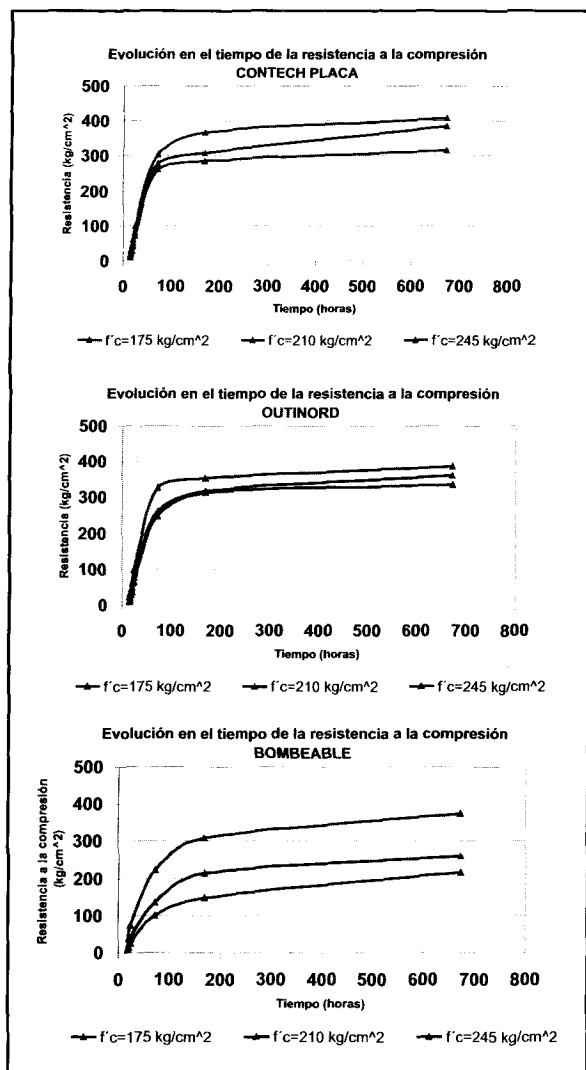


Figura 8. Resistencia a la compresión para el concreto Contech placa, Outinord y Concreto Bombeable a diferentes edades

5.2 Resistencia a la TENSIÓN Y MÓDULO DE ROTURA

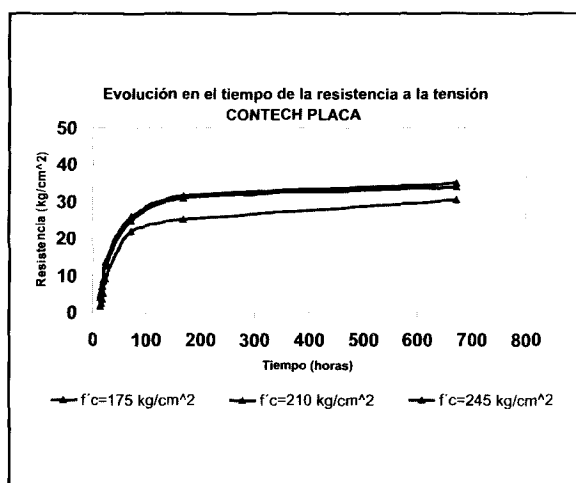
En la figura 9 se presenta la evolución de la resistencia a la tensión en el tiempo para las tres mezclas analizadas. Al igual que en el caso de la resistencia a la compresión, la curva de evolución temporal de la resistencia a la tracción de las mezclas Outinord y Contech presenta un aumento acelerado de la resistencia hasta los tres días (72 horas). A partir de este punto la tasa de crecimiento de la resistencia disminuye notablemente lo cual se visualiza en una pendiente relativamente horizontal en la Figu-

ras 9 a partir del tercer día. En el caso de los concretos Contech placa y Outinord el concreto a los tres días tiene una resistencia a la tracción indirecta superior a los 20 kg/cm² para las tres resistencias de diseño (175, 210 y 245 kg/cm²). Por su parte el concreto bombeable a la misma edad tiene resistencias inferiores a 20 kg/cm² en todos los casos.

Esta característica hace que el concreto convencional no sea adecuado para la construcción con sistemas industrializados, debido a que por la velocidad del proceso constructivo podrían aparecer fisuras por tracción generadas por flexión originadas en la aplicación temprana de las cargas asociadas con el peso de la formaleta y el personal.

Por otro lado, y de acuerdo con los resultados, el concreto Contech Placa tiene una resistencia a la tensión indirecta de 17% de la resistencia de diseño a la compresión, el concreto Outinord de 16% y el concreto Bombeable de 12%. En consecuencia, se puede mencionar que en promedio, el concreto usado en los sistemas industrializados tiene una mayor resistencia a la tensión indirecta que el concreto bombeable.

Debe mencionarse que las conclusiones presentadas anteriormente son corroboradas por los resultados de los ensayos de módulo de rotura, los cuales no son presentados en este documento.



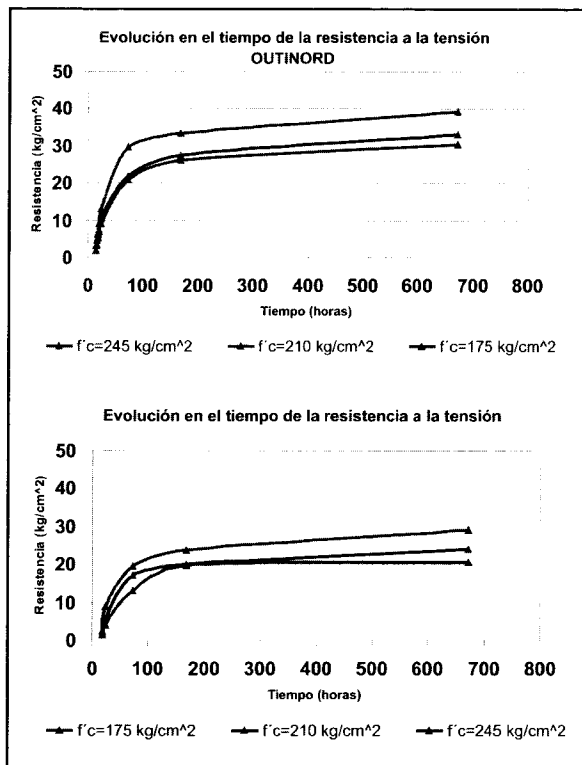


Figura 9. Resistencia a la tensión indirecta para el concreto Contech placa, Outinord y Concreto Bombeable a diferentes edades

7.3 Módulo de Elasticidad

En la figura 10 se presentan los resultados de la evolución temporal del módulo de elasticidad para las diferentes mezclas de concreto y resistencias estudiadas. En el caso de los concretos para los sistemas industrializados (Contech placa y Outinord) se observa una alta tasa de crecimiento inicial del módulo de elasticidad en las primeras horas de vaciado del concreto. Esta tasa de crecimiento disminuye notablemente con el transcurrir de las horas pero se mantiene creciente. Adicionalmente se anota que el módulo de elasticidad a los 28 días es en todos los casos superior a los valores estipulados en los códigos de diseño de concreto. Particularmente este aumento era predecible dado que el módulo de elasticidad es proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión. El comportamiento descrito anteriormente es bastante similar para las tres resistencias de diseño estudiadas en las mezclas de concreto para sistemas industrializados. Por

su parte el concreto bombeable presenta un comportamiento y una evolución temporal diferente a la de los concretos para los sistemas industrializados. El concreto bombeable presenta una tasa de crecimiento inicial menos pronunciada que la del Outinord y el Contech seguida de una tasa de crecimiento relativamente horizontal. Sin embargo lo que más se destaca de las curvas presentadas en la Figura 10 es que el módulo de elasticidad para las mezclas de concreto bombeable diseñadas para tener una resistencia final de 175 kg/cm² y 210 kg/cm² es inferior a lo estipulado en los códigos de diseño de concreto. Lo anterior es un indicativo de la alta variabilidad del módulo de elasticidad del concreto que no se presenta en los concretos especiales usados en la construcción con sistemas industrializados.

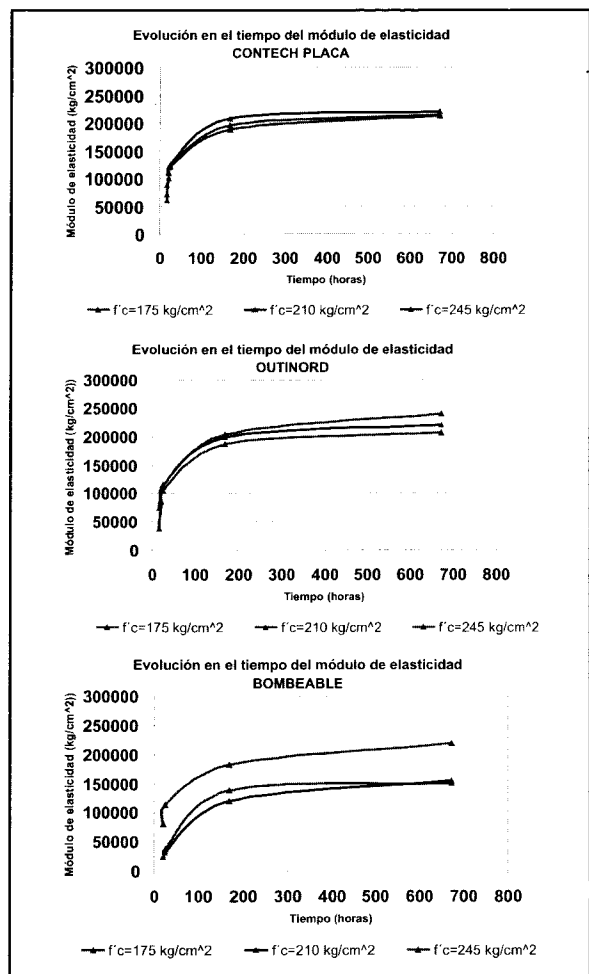


Figura 10. Módulo de elasticidad para el concreto Contech placa, Outinord y Concreto Bombeable a diferentes edades

5.4 Ensayo de Calorimetría

La medición de la temperatura generada por el proceso de hidratación del cemento, en un ambiente aislado térmicamente, permite establecer las características calorimétricas del concreto. Para ello es necesario registrar la evolución en el tiempo de la temperatura de la mezcla de concreto a edades tempranas. Este registro de temperatura vs. tiempo se presenta para cada una de las mezclas estudiadas en la figura 11.

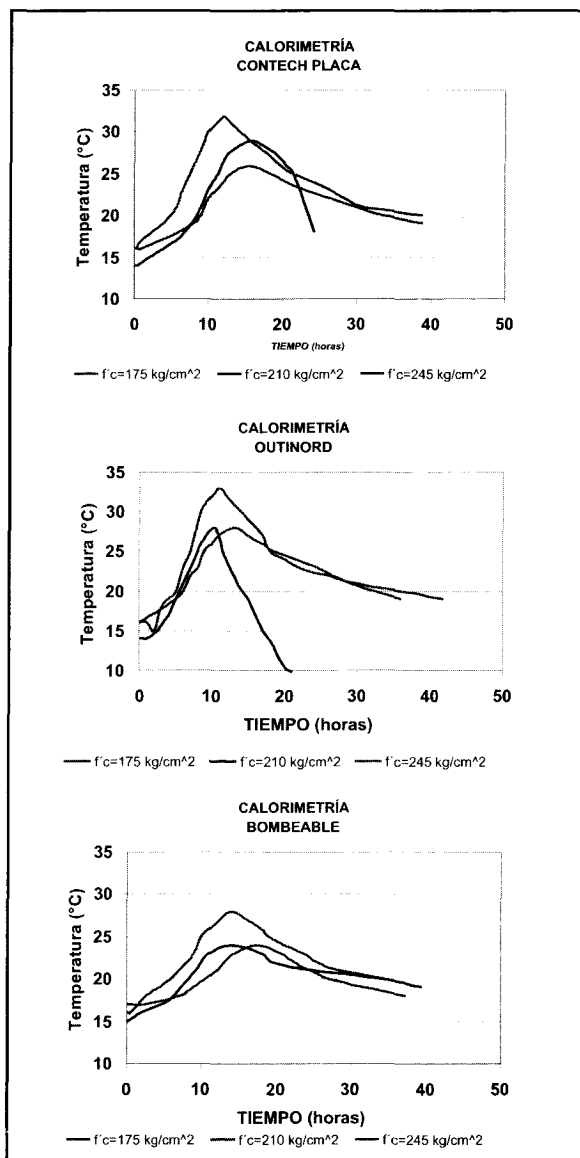


Figura 11. Perfil de calorimetría para el concreto Contech placa, Outinord y Concreto Bombeable

Una vez establecidas las curvas de evolución en el tiempo de la temperatura de la mezcla presentadas anteriormente, es necesario determinar para cada mezcla (Outinord, Contech placa y bombeable) la relación ΔT_{max} vs. Resistencia a la compresión, siendo ΔT_{max} la diferencia existente entre la máxima temperatura registrada y la temperatura inicial de la Figura 11.

Al llevar a cabo este proceso se obtienen curvas como las presentadas en la figura 12. Obsérvese que la tendencia de este tipo de gráficas puede asimilarse lineal. Gracias a estas curvas es posible establecer a partir de registros de temperatura durante las primeras 24 horas, la resistencia esperada de la mezcla a diferentes edades.

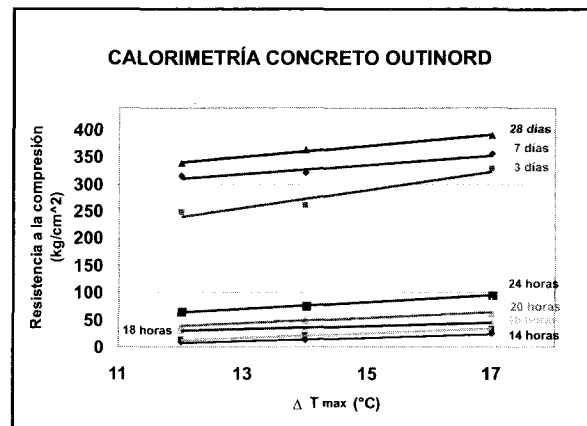


Figura 12. Relación entre el ΔT_{max} del perfil calorimétrico y la resistencia a compresión a diferentes edades para el concreto Outinord

Teniendo en cuenta que uno de los factores más importantes en las mezclas de concreto para los sistemas industrializados es la resistencia a edades tempranas (días), es posible utilizar los resultados de calorimetría de las primeras 24 horas para estimar la resistencia esperada de la mezcla de concreto y de esta manera establecer el momento ideal para retirar la cimbra. Utilizando este tipo de ensayos no destructivos se puede realizar un control de calidad de las mezclas a la vez que se minimiza la probabilidad de que aparezcan fisuras en las placas por sobrecargas a edades tempranas.

6. PLANTEAMIENTO DE UN MODELO PARA DETERMINAR LA ADHERENCIA ENTRE EL CONCRETO Y EL ACERO DE REFUERZO

En la actualidad, algunas de las construcciones de edificaciones con sistemas industrializados (tipo túnel y manoportables), realizadas en Bogotá están presentando fisuras en sus placas, cuya condición de estructurales o no estructurales se desconoce. Estas fisuras se hacen evidentes después de un tiempo de haber fundido la placa, sin conocerse a ciencia cierta en qué momento se han generado y cuáles son los agentes o factores causantes.

Basados en el anterior hecho se emprendió una investigación tendiente a caracterizar las propiedades mecánicas básicas de las mezclas de concreto a diferentes edades tal como se presentó en los apartados anteriores. Una de las propiedades mecánicas que se buscó determinar fue la evolución en el tiempo de la adherencia existente entre el acero de refuerzo y el concreto. Basados en lo anterior se adaptó el ensayo de adherencia entre un material compuesto (fibras de vidrio, fibras de carbono, fibras de aramida, etc) y el concreto con el fin de establecer de manera preliminar la edad para la cual el concreto y el acero presentan una adherencia adecuada.

El ensayo implementado en el laboratorio se basa en el equilibrio de fuerzas y de momentos que debe existir al interior de una viga simplemente apoyada con dos cargas aplicadas en los tercios de su luz (Figura 13a)). El dispositivo para ejecutar el ensayo se bosqueja en la Figura 13b) y su fotografía y planos se presentan en la Figura 14. Si la sección central de la viga está conformada por una rótula mecánica en la parte superior y una varilla en la zona inferior (Ver Figura 13b)), el momento generado al interior de la viga ($P \cdot L/6$) debe ser soportado por el par de fuerzas mostrados en la figura ($T \cdot d = C \cdot d$), en donde la rótula estaría sometida a compresión (Fuerza C) y la varilla está sometida a tracción (Fuerza T). Si se tiene en

cuenta que la rótula fue diseñada para que nunca fallase a compresión, el modo de falla de la viga debe estar asociado a la fluencia o al deslizamiento de la varilla.

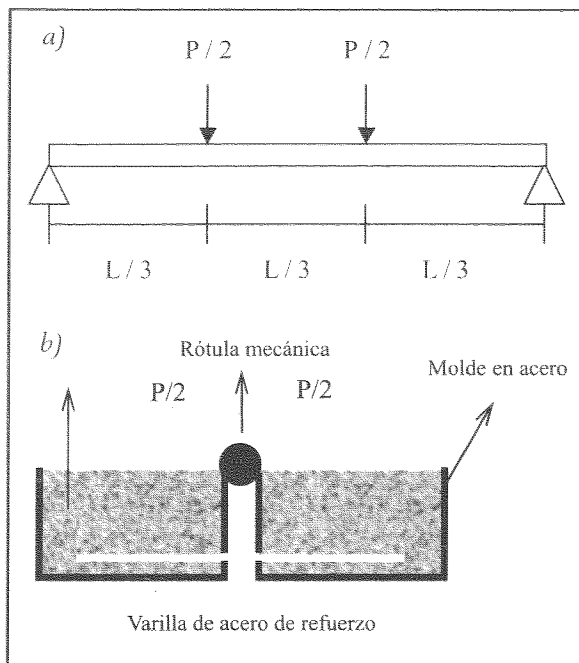


Figura 13. a) Viga simplemente apoyada con cargas en los tercios de su longitud. b) Dispositivo de ensayo y equilibrio de fuerzas internas en la zona central de la viga

La varilla instalada en la zona central del dispositivo de ensayo tenía un diámetro No. 2 ya que este es el diámetro usado en las mallas electrosoldadas de refuerzo colocadas en las placas de los sistemas industrializados. Se anota que para las dimensiones del molde se tuvo en cuenta que la varilla estuviese embebida dentro de los bloques de concreto (Ver Figura 13b) una longitud superior a la longitud de desarrollo establecida en los códigos de concreto para esta varilla. De esta manera se garantiza que si existe una adherencia adecuada entre el acero y el concreto, la falla se presenta por fluencia de la varilla y no por deslizamiento. Para la elaboración del ensayo, se coloca la varilla antes de vaciar el concreto y se procede a llenar el molde de igual manera que una viga para el ensayo de flexión.

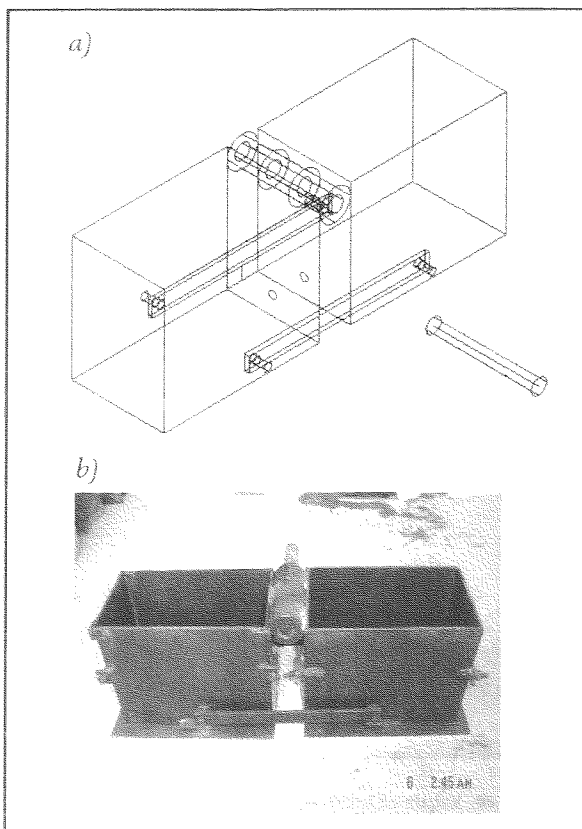
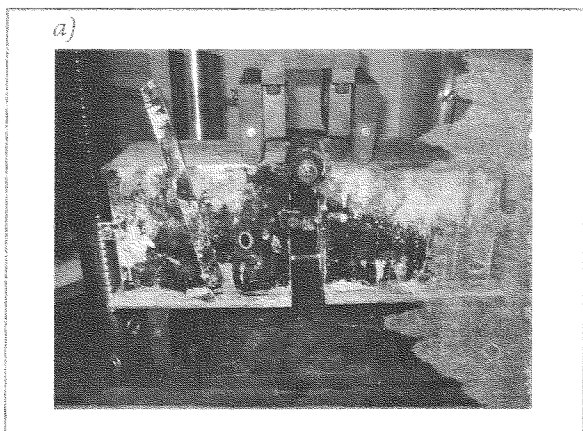


Figura 14. a) Modelo en AUTOCAD ® del dispositivo para ensayo b) Dispositivo para medición de la adherencia entre el concreto y el acero

En la Figura 15 se presenta el montaje del ensayo (Figura 15a) y la forma de falla (Figura 15b y 15c) a las 16 horas de fundido el concreto. Obsérvese que a esta edad se presenta un deslizamiento de la varilla antes de la fluencia de la misma. Este mismo ensayo se repitió a las 24 horas y de nuevo se presentó el mismo



esquema de falla. Con base en los resultados a compresión y a tensión, y la evolución temporal de las resistencia descritas en apartados anteriores, se espera que a los tres días la falla del sistema tenga su origen en la fluencia de la varilla. Sin embargo este aspecto aun es objeto de estudio dentro de la investigación.

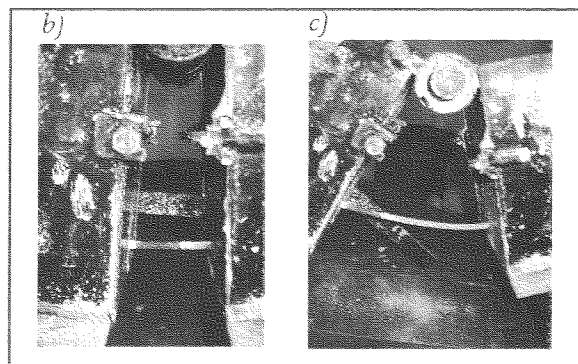


Figura 15. a) Montaje en la máquina universal del dispositivo de ensayo b) Inicio del deslizamiento de la varilla c) Foto de el estado final del ensayo

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- A la edad de tres días el concreto Contech Placa y el Outinord trabajan con una resistencia por encima de la resistencia de diseño entre 142 % y 133 % respectivamente, a diferencia del concreto bombeable el cual obtiene su resistencia de diseño a los 28 días.
- El concreto usado en los sistemas industrializados tiene una mayor resistencia a la tensión indirecta (y módulo de rotura) que el concreto utilizado en sistemas convencionales de construcción. Por esta razón no se recomienda el uso del concreto bombeable para la construcción con sistemas industrializados debido a que se pueden generar grietas originadas en esfuerzos de tracción (por flexión) causadas por las cargas sobreimpuestas a las placas a edades tempranas.
- La calorimetría es un ensayo que aunque sólo dura 24 horas se puede utilizar para

estimar el valor de la resistencia a la compresión a cualquier edad sin necesidad de usar ensayos destructivos. No obstante este tipo de ensayos deben ser calibrados mediante procedimientos estadísticos basados en ensayos destructivos elaborados en laboratorio. Así mismo con base en los ensayos de calorimetría se pueden estimar datos de resistencia en obra que permitan tomar la decisión sobre el momento adecuado para retirar la formaleta minimizando el riesgo de aparición de fisuras por tensión en el concreto, teniendo en cuenta una especificación de resistencia inicial calculada mediante un modelo matemático adecuado.

- Se recomienda realizar más pruebas del ensayo de adherencia para poder determinar la curva de evolución de la resistencia en función del tiempo.

8. REFERENCIAS

1. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO, ASOCRETO, Construcción con sistemas industrializados de muros en concreto para vivienda. Memorias, 2003.
2. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO, ASOCRETO, *Tecnología y propiedades, Colección básica del concreto*, Asocreto, Bogotá, 1997.
3. ASTM C 1074, 1998, American Society for Testing Materials, Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, volume 4.02.
4. CEMEX CONCRETOS DE COLOMBIA, *Guía Técnica*, Bogotá, 2003
5. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, *Manual de tecnología del concreto*, Limusa Noriega Editores, México, 1994.
6. FORMALETAS S.A. – FORSA. Tomado de internet: URL: <http://www.forsa.com.co/>
7. ICONTEC. Normas Técnicas Colombianas. 2003.
8. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, *Tecnología del concreto*, Editorial Limusa, México, 1989.
9. KIEGER, Paul & LAMOND, Joseph, *Significance of test and properties of concrete and concrete making materials*, Bond with reinforcing steel, pág. 202-208, 1994.
10. SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego, *Tecnología del concreto y del mortero*, Editorial Bhandar, 3a edición, Bogotá, 1996.
11. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, *Industrialización de la construcción*, Magíster ingeniería civil, Área de ingeniería y gerencia de la construcción (MICIGC).

9. AGRADECIMIENTOS

Este documento está enmarcado dentro del proyecto denominado “*Determinación de las causas de fisuras en placas de sistemas industrializados, para la construcción de edificaciones en Bogotá y planteamiento de posibles soluciones*”, financiado por la Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Javeriana y ejecutado por el grupo de investigación *Estructuras*.

Los autores desean agradecer la colaboración de CEMEX Colombia, quien suministró todos los materiales, las mezclas para la ejecución de los ensayos presentados en este documento y ejecutó parte de los ensayos en su laboratorio del Centro de Tecnología del Concreto.