

VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A HENDIMIENTO EN EL HORMIGÓN.

Rodrigo Espinoza Moraga¹
Sergio Martínez Trejo²

1.- RESUMEN

Actualmente uno de los métodos indirectos para determinar la resistencia a tracción del hormigón más difundidos es el ensayo de tracción por hendimiento, debido a su facilidad de ejecución y reproducibilidad.

Se quiso investigar la confiabilidad del ensayo en la variación de la resistencia a tracción. Este trabajo consistió en un estudio experimental acerca de la incidencia en los resultados de la resistencia de tracción por hendimiento de los siguientes factores: Edad, Humedad de Ensaye y Nivel de Vibrado.

Con el fin de llegar a conclusiones objetivas se utilizó un estudio estadístico basado en un modelo de análisis de varianza de los resultados.

Para probetas moldeadas de hormigón, la única variable que incidió significativamente en la resistencia es la edad de ensaye para aquellas provenientes de una cámara de curado e inmersas en una piscina 48 horas antes del ensayo. Para ambas edades se observó que una variación de las condiciones de humedad de la probeta, al momento del ensayo, no implica necesariamente variación de la resistencia de tracción por hendimiento. El comportamiento de la resistencia para testigos de hormigón es diferente. No se observó ninguna tendencia clara de disminución o incremento de la tensión a hendimiento al variar alguno de los tres factores considerados en este estudio.

En general, se concluyó que el ensayo de hendimiento no es el mejor indicador de la resistencia a tracción del hormigón.

2.- INTRODUCCIÓN

La materialización de la medida directa de la resistencia a la tracción presenta algunas dificultades. Por ello es frecuente que la resistencia a la tracción se evalúe a través de métodos indirectos.

El ensayo de hendimiento ha sido el método más empleado para evaluar la resistencia a la tracción. Es fácil de ejecutar y su utilización se encuentra muy extendida, pero se han planteado dudas respecto a la influencia de la presencia de poros, las condiciones de humedad al momento del ensayo y la edad del testigo o probeta sobre el valor de la resistencia a la tracción indirecta.

¹ Ingeniero Civil – Universidad de Santiago de Chile

² Ingeniero Civil – Laboratorio Nacional de Vialidad– MOP

En el Laboratorio Nacional de Vialidad (LNV) hay conocimiento de la influencia de las condiciones de humedad para los ensayos de compresión y flexotracción, pero no existe nada concreto con respecto al ensayo de hendimiento. Se desea conocer si hay alguna diferencia considerable, en la resistencia a la tracción, al momento del ensayo, al aplicar distintas condiciones de humedad a los testigos de hormigón.

Para aprobar la calidad de un hormigón de pavimento se utiliza, como parámetro de control, la resistencia a flexotracción a los 90 días. Sin embargo, la mayoría de las veces, las dosificaciones de los hormigones están referidas a la resistencia a compresión a 28 días. Debido al largo tiempo involucrado, se recurre a proyectar la resistencia de los 28 a los 90 días. De aquí que resulte interesante conocer el comportamiento de la resistencia a tracción a dichas edades.

Con el presente estudio se pretende aclarar si los factores mencionados influyen o no en forma significativa en los resultados del ensayo. Así se podrá observar si la resistencia a la tracción indirecta es un buen parámetro de medida de la tracción en el hormigón.

Objetivos

- Realizar un adecuado diseño experimental.
- Con los datos que arroje la experiencia, observar como afecta en los resultados del ensayo brasileño: la edad, condición de humedad al momento del ensayo y el nivel de vibrado del hormigón.
- Comparar las resistencias obtenidas al ensayar probetas moldeadas confeccionadas en laboratorio y testigos de losa de hormigón.
- Hacer un análisis de datos empleando métodos estadísticos de modo que los resultados y conclusiones sean objetivos.

3.- ENSAYO DE TRACCIÓN POR HENDIMIENTO

En esta prueba se coloca un cilindro, con su eje horizontal entre las platinas de la máquina de prueba y se incrementa la carga hasta la falla por separación a lo largo del diámetro vertical. Cuando la carga se aplica a lo largo de la generatriz, un elemento en el diámetro vertical del cilindro (figura 1) queda sometido a un esfuerzo vertical de compresión de:

$$s_v = \frac{2P}{pLd} \left[\frac{d^2}{r(d-r)} - 1 \right] \text{ y a un esfuerzo horizontal de tracción de: } s_h = \frac{2P}{pLd}$$

Donde P es la carga de compresión sobre el cilindro, L es el largo del cilindro, d es su diámetro, r y $(d-r)$ son las distancias del elemento desde las dos cargas respectivamente.

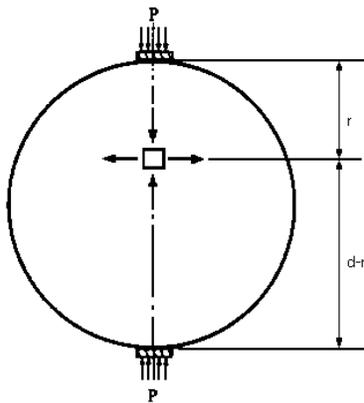


Figura 1. Prueba brasileña de tracción.

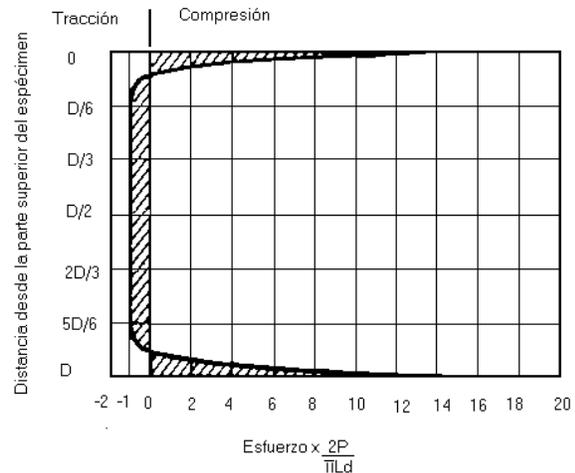


Figura 2 Distribución del esfuerzo horizontal en un cilindro cargado.

En estas circunstancias, el esfuerzo horizontal sobre una sección que contiene el diámetro vertical es como se muestra en la figura. 2. El esfuerzo se expresa en términos de $2P/pLd$ y puede observarse que existe un elevado esfuerzo horizontal de compresión en la vecindad de las cargas, pero como esto va acompañado por un esfuerzo vertical de compresión de magnitud comparable, produciéndose así un esfuerzo biaxial, no se presenta la falla por compresión.

4.- ETAPA EXPERIMENTAL

A continuación se ofrece una guía del procedimiento recomendado.

- ⇒ Elección de factores y niveles.
- ⇒ Elección del diseño experimental.
- ⇒ Realización del experimento.
- ⇒ Análisis de datos.
- ⇒ Conclusiones y recomendaciones.

4.1 ELECCIÓN DE FACTORES Y NIVELES

Lo primero que se realizó fue determinar qué factores influyen directamente en la resistencia a tracción por hendimiento.

a) Testigos de hormigón (HF 4.6 MPa; esbeltez 2.0; manto refrentado)

- ⇒ Edad (días):
 - 28
 - 90
- ⇒ Humedad de ensaye:
 - Inmerso en piscina de curado 48 hrs.
 - Cámara de curado 90% humedad relativa
 - Humedad ambiente, 48 hrs previo al ensaye
- ⇒ Nivel de vibrado de la mezcla:
 - Bien vibrado
 - Pobrementemente vibrado

- b) Probetas moldeadas de hormigón (HF 4.6 MPa; esbeltez 2.0; uso de tablilla como faja de distribución de carga)

Ídem, excepto por el nivel de vibrado de la mezcla, el cual no fue considerado.

4.2 ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

El muestreo aleatorio tiene dos propósitos.

- 1) Evitar la posibilidad de sesgo introducida por una selección no aleatoria de los elementos de la muestra.
- 2) Suministrar una base probabilística para la selección de una muestra, es decir, tratar la selección de una muestra como un experimento, permitiendo así calcular la probabilidad de una muestra observada y utilizar esta probabilidad para hacer inferencias.

4.2.1 PRUEBAS DE HIPÓTESIS

Se formula una conjetura. Si hay alguna variación en el proceso, y se sospecha que ha cambiado el valor de un parámetro, tal conjetura recibe el nombre de **hipótesis alternativa**. La proposición lógica contraria, es decir, que el valor del parámetro no ha cambiado, recibe el nombre de **hipótesis nula**. Las hipótesis estadísticas pueden ser verdaderas o falsas

Para probar una hipótesis hay que diseñar un procedimiento para tomar una muestra aleatoria y calcular una estadística de prueba apropiada con el objeto de rechazar o no la hipótesis nula H_0 .

Cuando se llevan a cabo experimentos con dos o más factores, el método que mejor se adapta para obtener una muestra representativa del espacio muestral es el Diseño Factorial. Esto se debe a que son más eficientes, dado que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento.

Del análisis del diseño factorial, y conociendo los factores que actúan y sus niveles, se puede determinar la cantidad de combinaciones o mejor dicho la cantidad de tratamientos que se deben realizar. En las tablas 1 y 2 se muestran los tratamientos (T y A) realizados.

TABLA 1

TRATAMIENTOS A PROBETAS MOLDEADAS
(HF 4.6 Mpa; esbeltez 2.0; uso de tablilla
como faja de distribución de carga)

		Edad (días)	
		28	90
Condición de humedad al momento del ensayo	Saturado mín. 24 hr.	T1	T2
	Cam. Curado 90% H.R.	T3	T4
	Humedad ambiente	T5	T6

TABLA 2 TRATAMIENTOS A TESTIGOS DE HORMIGÓN
(HF 4.6 Mpa; esbeltez 2.0; manto refrentado)

Nivel de vibrado		Edad (días)			
		28		90	
		Bien vibrado	Pobrementemente vibrado	Bien vibrado	Pobrementemente vibrado
Condición de humedad al momento del ensayo	Saturado mín. 24 hr.	A1	A2	A3	A4
	Cámara de curado 90% humedad relativa	A5	A6	A7	A8
	Humedad ambiente	A9	A10	A11	A12

El diseño factorial considera que el análisis de varianza, donde se considera la variable respuesta, es una función que depende de sí misma, de tres y dos variables independientes entre sí respectivamente (mostrados en tablas anteriores). Además considera la interacción entre los factores más un componente debido al error (perturbación o ruido).

Así, el interés está en detectar que parámetros están relacionados con la variable respuesta. Para esto se realiza lo que se conoce como Prueba de Hipótesis, que equivale, mediante estadística matemática e información del experimento, rechazar o no cierta afirmación que sea de interés, saber si los efectos están relacionados con la variable respuesta. Por lo tanto, se realiza una prueba de hipótesis, donde la hipótesis nula (H_0) es que todos los efectos no son significativos en el modelo, o sea son iguales a cero, versus la hipótesis alternativa (H_1) que es lo contrario, es decir, algún efecto es significativo o distinto de cero.

Entonces:

$$H_0 : \varphi_i^A = \varphi_j^B = \varphi_k^C = \varphi_l^D = \varphi_{ij}^{AB} = \varphi_{ik}^{AC} = \varphi_{jk}^{BC} = \varphi_{ijk}^{ABC} = 0 \quad \forall i \forall j \forall k$$

$$H_1 : \varphi_i^A \neq \varphi_j^B \neq \varphi_k^C \neq \varphi_{ij}^{AB} \neq \varphi_{ik}^{AC} \neq \varphi_{jk}^{BC} \neq \varphi_{ijk}^{ABC} \neq 0$$

Para lo menos un i, j, k o l.

4.2.2 DETERMINACIÓN DEL ESPACIO MUESTRAL

Para el análisis mediante el diseño factorial se tiene que los factores y sus niveles se comportan como parámetros de efectos fijos. Esto permite utilizar una expresión, dependiente de la varianza, para calcular el tamaño apropiado de la muestra (número de réplicas, n).

En este caso, la varianza es un dato que no se conoce a priori por lo cual interesa que no aparezca en la ecuación. A través de un tratamiento matemático se puede llegar a:

$$f = \sqrt{\frac{n \times b \times c \times (a - 1)}{a^2}}$$

Donde: $\Rightarrow \phi$: parámetro que se obtiene de tablas.

- \Rightarrow n : número de réplicas a realizar
- \Rightarrow a : nivel del factor A
- \Rightarrow b : nivel del factor B
- \Rightarrow c : nivel del factor C

Para obtener el parámetro ϕ se deben usar las curvas características de operación para el análisis de varianza del modelo de efectos fijos. [Ref.4]

4.2.3 NÚMERO DE RÉPLICAS

Se procedió a determinar el número de réplicas de todos los casos para ver así cual es el de trabajo. Se seleccionó el caso que arrojó el número de réplicas mayor.

El análisis se hizo por separado para testigos de hormigón, donde se llegó a que con 3 réplicas se obtendría un número representativo de muestras; y para probetas moldeadas se necesitaron seis réplicas de cada tratamiento.

4.3 REALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento consiste en la confección de dos losas de hormigón para la extracción de testigos; y el llenado de moldes metálicos (cilindros y cubos) con el mismo hormigón utilizado en las losas. Se obtuvieron un total de 36 testigos cilíndricos de 150 mm. de diámetro para los ensayos de hendimiento.

Se optó por un premezclado HF 4.6 (80)40/6. hormigón de pavimento con una resistencia característica a la flexotracción de 4.6 MPa; un nivel de confianza del 80%; tamaño máximo nominal del árido grueso de 40 mm; y una docilidad de 6 cm expresada por el asentamiento de cono de Abrams. La dosificación utilizada fue la siguiente:

Cemento Grado Alta Resistencia	: 330 Kg/m ³
Grava	: 850 Kg/m ³
Gravilla	: 430 Kg/m ³
Arena	: 780 Kg/m ³
Aditivo Reductor	: 1.65 Kg/m ³
Relación A/C	: 0.46

Debido a la fecha de hormigonado (mediados de enero), y la ubicación de la losa (expuesta a pleno sol), se optó por utilizar más de un sistema de curado. Se aplicó una membrana, se utilizaron láminas impermeables de polietileno y finalmente se usaron cubiertas mojadas.

La condición mínima para la extracción de testigos adoptada en este estudio, es que la resistencia de compresión sea igual o superior a 10 MPa, expresada como resistencia cúbica. Se confeccionaron probetas cúbicas de 150 mm. de arista para la determinación de dicha resistencia. La media obtenida a los 12 días fue de 40,38 MPa

Se requiere obtener probetas de ensayo con esbeltez lo más próxima a 2. Por esto se cortaron con sierra disco uno o ambos extremos del testigo.

4.3.1 ACONDICIONAMIENTO DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN

La idea es que todas las probetas tengan el mismo curado. Así, todas fueron guardadas en cámara de curado hasta cumplir las fechas de ensayo (28 y 90 días). y sólo 48 horas antes de este se cambiaron las condiciones de humedad.

4.3.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS PARA EL ENSAYO DE HENDIMIENTO

Se siguió la especificación LNV 84, que es una adaptación de la norma NCh 1170 of.77. Se optó por refrentar el manto en la zona de carga en vez de utilizar tablillas como faja de distribución, destinado a corregir defectos de planeidad y/o paralelismo entre caras y obtener una distribución uniforme de tensiones durante la aplicación de la carga. (Ver figura 3).



Figura 3

Secuencia de refrentado de testigos

4.3.3 EXPRESIÓN DE RESULTADOS

Calcular la resistencia a la tracción por hendimiento como la tensión de rotura según la fórmula:

$$\sigma_h = \frac{2P}{\pi LD}$$

en que:

σ_h = resistencia a tracción por hendimiento

P = carga máxima aplicada por la máquina de ensaye

L = longitud de ensaye de la probeta

D = diámetro de la probeta

4.3.4 RESULTADOS OBTENIDOS

La resistencia de tracción por hendimiento tanto en testigos como en probetas de hormigón se muestra en la tabla 3. Además se incluyen las densidades de cada observación.

5.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

Este trabajo se basa en los resultados entregados por un programa de análisis estadístico (SAS, Statistic Analysis System). Con ello se determinó si las hipótesis estadísticas planteadas se aceptan o rechazan y si la elección del método fue el adecuado.

Para concluir si un factor es incidente o no en la variable de respuesta (hendimiento) es necesario construir una tabla de análisis de varianza, la cual permitirá determinar una región de rechazo de la hipótesis nula.

Si se considera t tratamientos y r réplicas de cada uno, entonces se puede confeccionar la tabla 4 de análisis de varianza.

Tabla 3 Resultados de ensaye a hendimiento a:

Testigos de hormigón					Probetas moldeadas de hormigón				
Trat.	Réplica	Edad (días)	Densidad Kg/m ³	Hendimiento Mpa	Trat.	Réplica	Edad (días)	Densidad Kg/m ³	Hendimiento Mpa
A1	1	28	2410	3,0	T1	1	28	2450	3,1
	2	28	2440	2,8		2	28	2420	3,1
	3	28	2430	3,9		3	28	2430	3,4
A2	1	28	2420	3,8		4	28	2450	3,2
	2	28	2420	3,2		5	28	2450	3,2
	3	28	2440	3,1		6	28	2440	2,9
A5	1	28	2380	3,1	T3	1	28	2440	2,8
	2	28	2400	4,1		2	28	2420	3,4
	3	28	2410	3,2		3	28	2440	2,9
A6	1	28	2410	3,3		4	28	2420	3,4
	2	28	2430	4,6		5	28	2420	3,5
	3	28	2390	3,1		6	28	2430	3,4
A9	1	28	2390	3,0	T5	1	28	2350	3,5
	2	28	2380	3,5		2	28	2400	3,0
	3	28	2530	3,6		3	28	2380	3,5
A10	1	28	2520	3,1		4	28	2460	3,3
	2	28	2560	3,5		5	28	2410	3,4
	3	28	2570	4,1		6	28	2400	3,2
A3	1	90	2430	3,5	T2	1	90	2450	3,5
	2	90	2440	3,5		2	90	2480	3,5
	3	90	2430	3,2		3	90	2450	3,5
A4	1	90	2430	3,1		4	90	2440	3,4
	2	90	2420	3,4		5	90	2430	3,4
	3	90	2440	3,1		6	90	2450	3,5
A7	1	90	2450	3,5	T4	1	90	2440	3,6
	2	90	2460	3,9		2	90	2460	3,1
	3	90	2410	3,7		3	90	2430	3,4
A8	1	90	2420	3,4		4	90	2440	3,8
	2	90	2410	3,0		5	90	2420	4,0
	3	90	2420	3,2		6	90	2450	3,5
A11	1	90	2400	3,1	T6	1	90	2430	3,5
	2	90	2450	3,5		2	90	2430	3,8
	3	90	2460	3,8		3	90	2440	3,7
A12	1	90	2400	4,2		4	90	2420	3,6
	2	90	2420	3,5		5	90	2430	3,0
	3	90	2400	3,9		6	90	2420	3,5

Tabla 4. Análisis de varianza

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Tratamiento	$t-1$	$SC\tau$	$CM\tau$	$CM\tau / CME$
Error	$t(r-1)$	SCE	CME	
Total	$rt-1$	SCT		

Donde: $SC\tau$: Suma de cuadrados de tratamientos $CM\tau$: Cuadrado medio de tratamientos
 SCE : Suma de cuadrados del error CME : Cuadrado medio del error
 SCT : Suma de cuadrados total $F = \frac{CM\tau}{CME} \approx F(t-1, t(r-1))$

El estadístico de prueba F se distribuye Snedecor con grados de libertad (t-1) y t(r-1). En tablas de F(t-1, t(r-1)) se encuentra A tal que $P(F \geq A) = \alpha$. Con $\alpha = 0.05$ se encuentra la región crítica (de rechazo de H_0):

$$R = [A, +\infty[$$

En la tabla 5 se presenta un resumen de los análisis de varianza a los distintos factores estudiados tanto en probetas como en testigos de hormigón ensayados a hendimiento.

Tabla 5. Cuadro Resumen de incidencia o no incidencia de un determinado factor en la variable respuesta (resistencia a tracción) en el ensayo de hendimiento						
Ensayo	Factor fijo Nº1	Nivel factor fijo Nº1	Factor fijo Nº2	Nivel factor fijo Nº2	Variable estudiada	Incidencia de la variable
Probeta	Humedad	Sat. Piscina 48h			Edad	S
		Cámara de curado				N
		Hum.ambiente 48h				N
	Edad	28 días			Humedad	N
		90 días				N
Testigo	Vibrado	Bien vibrado	Humedad	Sat. Piscina 48h	Edad	N
				Cámara de curado		N
				Hum.ambiente 48h		N
		Mal vibrado	Humedad	Sat. Piscina 48h		N
				Cámara de curado		N
				Hum.ambiente 48h		N
	Vibrado	Bien vibrado	Edad	28 días	Humedad	N
				90 días		N
		Mal vibrado	Edad	28 días		N
				90 días		S
	Humedad	Sat. Piscina 48h	Edad	28 días	Vibrado	N
				90 días		N
		Cámara de curado	Edad	28 días		N
				90 días		S
		Hum.ambiente 48h	Edad	28 días		N
90 días				N		

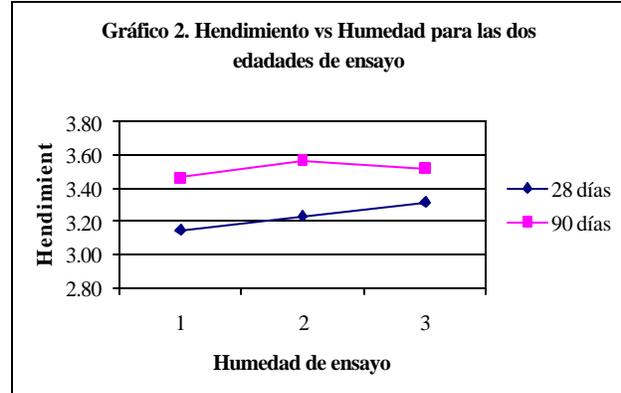
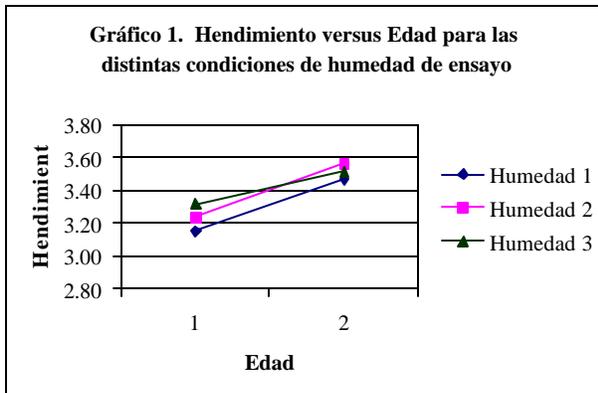
5.1 ANÁLISIS GRÁFICO DE LA RESPUESTA EN PROBETAS Y TESTIGOS DE HORMIGÓN

La notación utilizada es la que sigue:

- **Humedad 1:** Se mantuvo al testigo 48 horas antes del ensayo en piscina de curado con agua saturada con cal a temperatura controlada (20°C)
- **Humedad 2:** Curado normal en cámara con 90% de humedad relativa

- **Humedad 3:** 48 horas antes del ensayo el testigo se retiró de la cámara de curado y se mantuvo a la humedad ambiente de la sala.
- **Vibrado 1:** La losa fue vibrada adecuadamente siguiendo las disposiciones del LNV.
- **Vibrado 2:** El vibrado de la losa fue deficiente y además se introdujeron bolas de papel en la mezcla para generar nidos.
- **Edad 1:** Los testigos se ensayaron a los 28 días.
- **Edad 2:** Los testigos se ensayaron a los 90 días.

5.1.1 PROBETAS MOLDEADAS DE HORMIGÓN



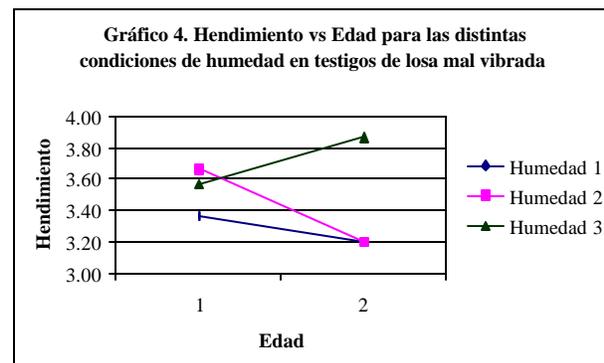
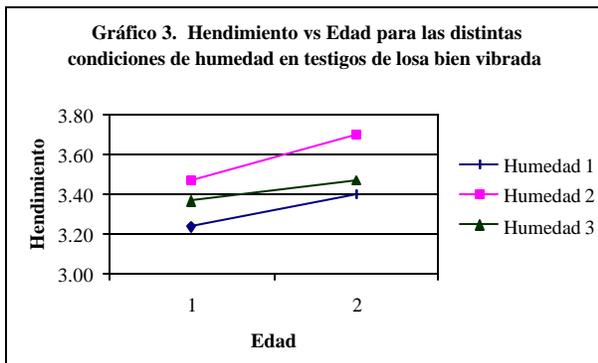
En el gráfico 1 se aprecia un incremento aproximado de 9% de las probetas ensayadas a los 90 días con respecto al ensayo a los 28 días para las diferentes condiciones de humedad de ensayo.

El gráfico 2 muestra que las mejores resistencias se presentan para aquellas probetas ensayadas a los 90 días y que fueron curadas íntegramente en cámara, a temperatura y humedad controlada.

5.1.2 TESTIGOS ASERRADOS DE LOSA DE HORMIGÓN

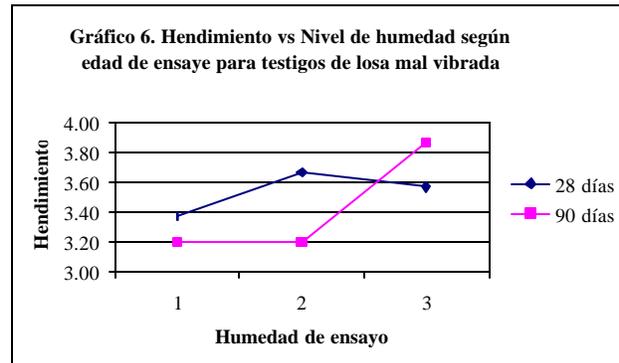
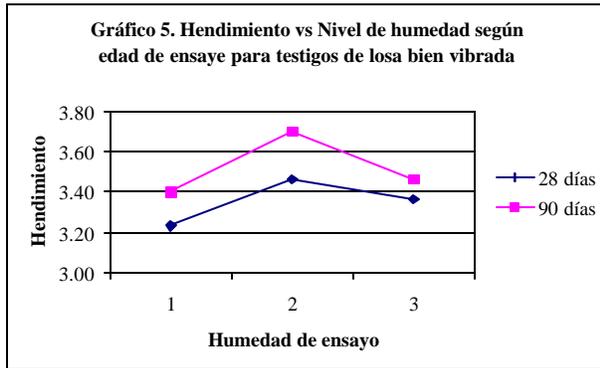
5.1.2.1 HENDIMIENTO VS. EDAD PARA LAS DISTINTAS CONDICIONES DE HUMEDAD Y NIVELES DE VIBRADO

En el gráfico 3 se observa que en los testigos extraídos de la losa bien vibrada hay un claro incremento de la resistencia a hendimiento con la edad, independiente de la condición de humedad a los que fueron ensayados.



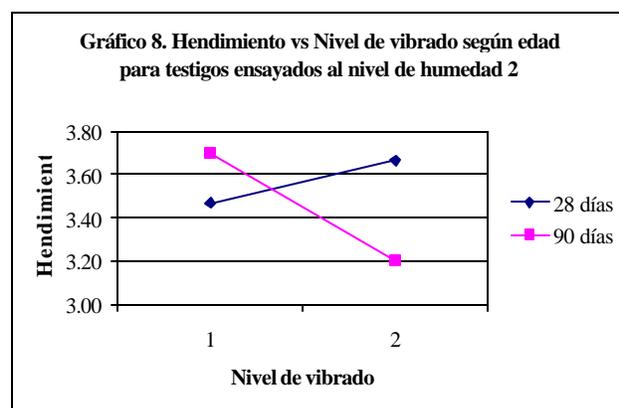
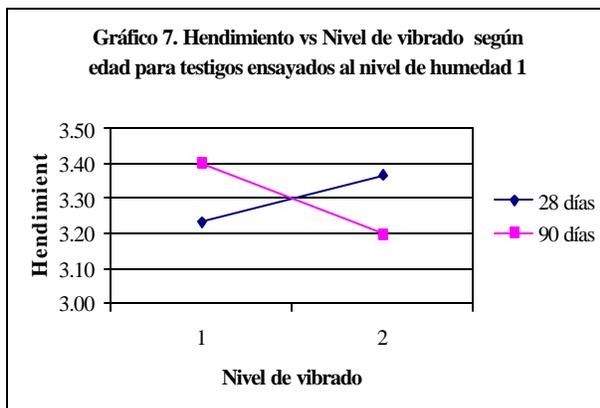
La tendencia del gráfico 4 no es la misma que el anterior. Por el contrario, dos condiciones de humedad de ensaye ven disminuida la resistencia al aumentar la edad del testigo. Sólo aquellos que se dejaron secar al aire 48 horas antes del ensayo obtuvieron un incremento promedio del 8.4% al comparar ensayos a los 28 y 90 días.

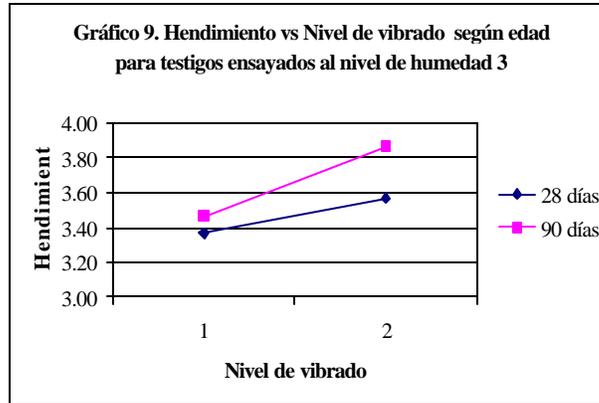
5.1.2.2 HENDIMIENTO VS. HUMEDAD SEGÚN EDAD Y NIVELES DE VIBRADO



Si se comparan los gráficos 5 y 6 se observa que las resistencias promedio para las tres condiciones de humedad son mayores para los testigos ensayados a los 90 días para el caso de la losa bien vibrada. Sin embargo, el comportamiento de la resistencia a hendimiento de los testigos extraídos de la losa mal vibrada no sigue la misma tendencia. Mas bien, la resistencia disminuye con la edad y sólo se ve una mejoría en los testigos que se dejaron secar al aire en sala 48 horas antes del ensayo.

5.1.2.3 HENDIMIENTO VS. NIVEL DE VIBRADO SEGÚN EDAD PARA TESTIGOS EN DISTINTAS CONDICIONES DE HUMEDAD





6.- CONCLUSIONES

Cilindros húmedos, ensayados a tracción por el método de hendimiento, tienden a romperse con una suave y lenta fractura, mientras que los ensayados secos se rompen repentinamente.

La resistencia de tracción por hendimiento no está sometida significativamente a la influencia del contenido de humedad (variación de resistencia del orden de 16%) por cuanto las tensiones máximas se presentan en el interior de la probeta y no como en el ensayo de flexotracción en que las tensiones máximas se producen en la fibra exterior que está expuesta a sufrir desecación y retracciones.

Para probetas moldeadas de hormigón, la única variable que incide significativamente en la resistencia de tracción por hendimiento es la edad de ensaye, pero bajo una determinada condición de humedad debido precisamente a que no se alcanza un equilibrio entre el centro y el borde de la probeta. Como se sabe, la grieta comienza al centro y se propaga en dirección a la zona de carga.

El rango promedio de las observaciones es de 3.2 a 3.6 MPa. El incremento de la resistencia a los 90 días va del 6 al 10% del valor obtenido a los 28 días. Esto es comparable con los datos de otras investigaciones.

Para ambas edades (28 y 90 días) se observa que al variar las condiciones de humedad al momento del ensayo no implica necesariamente variación de la resistencia de tracción por hendimiento. A los 28 días hay un leve incremento (3%) a medida que la probeta se ensaya en una condición más seca. A los 90 días no existe la misma tendencia, sino que las resistencias son muy similares.

Esto demuestra la independencia de la resistencia de tracción por hendimiento de las condiciones de humedad de la probeta.

El comportamiento de la resistencia a tracción por hendimiento para testigos de hormigón es diferente. No se observa ninguna tendencia clara de disminución o incremento de la tensión a hendimiento al variar alguno de los tres factores considerados en este estudio: edad, humedad de ensayo y nivel de vibrado.

El análisis según gráfico 3 de la variación de la resistencia con la edad de ensayo, para las distintas condiciones de humedad de los testigos de la losa bien vibrada, podría llevar a concluir que existe dependencia de ella. El incremento promedio con la edad es de 5%. Pero el análisis de varianza es concluyente: no hay variación significativa.

En testigos de losa deficientemente vibrada, bajo dos condiciones de humedad se presenta disminución de la resistencia con la edad de ensaye. Tan sólo los testigos que se secaron al aire muestran un incremento promedio de un 8%. Puede atribuirse la disminución de la resistencia con la edad a que la losa mal vibrada cuenta con una mayor cantidad de poros por lo tanto, con el tiempo, el agua puede penetrar más al interior del testigo y perjudicar de esta forma su calidad estructural.

El análisis del factor humedad, en la variable resistencia a tracción, arroja que la condición de humedad de ensaye sólo incide en la resistencia a hendimiento en testigos mal vibrados ensayados a los 90 días. Hay una marcada diferencia de la resistencia a tracción entre testigos que se curaron completamente en cámara de curado y los que se dejaron secar al aire 48 horas antes del ensaye. Pero en testigos de losa bien vibrada la variación es pequeña, concluyéndose que no hay dependencia de la resistencia a tracción por hendimiento con la condición de humedad.

En general el nivel de vibrado de los testigos no influye en la resistencia de tracción por hendimiento; sólo escapan a esta regla las observaciones obtenidas de testigos curados completamente en cámara de curado y ensayados a los 90 días. En este caso se manifestó una marcada disminución de la resistencia de 14% entre los testigos extraídos de la losa bien y mal vibrada.

7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. M. Piñeiro, S. Valenzuela y J. Genta. "EL ENSAYE DE FLEXOTRACCIÓN Y EL ENSAYE DE HENDIMIENTO DEL HORMIGÓN". Revista IDIEM, Volumen 6 N°2. Octubre de 1967.
2. F.L. Carneiro y A. Barcellos. "TENSILE STRENGTH OF CONCRETES". Buletin RILEM N°13. March 1953.
3. A.M. Neville. "TECNOLOGÍA DEL CONCRETO". Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Editorial Limusa. 1989.
4. Douglas Montgomery. "DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTO". Tercera edición. Editorial Iberoamericana.1991.
5. Carlos Prado Campos. "Estadística Aplicada". Departamento Matemática y Ciencia de la Computación. Universidad de Santiago de Chile. 1997.
6. Ali R. Khaloo and Nakseok Kim. "EFFECT OF CURING CONDITION ON STRENGTH AND ELASTIC MODULUS OF LIGHTWEIGHT HIGH-STRENGTH CONCRETE". ACI Materials Journal. Vol.96 N°4. July - August 1999.
7. Dirección Nacional de Vialidad. "ESPECIFICACIONES Y METODOS DE MUESTREO Y ENSAYE DE LA DIRECCION DE VIALIDAD". Dirección General de Obras Públicas MOP-CHILE.