

Relación de algunas experiencias acerca de la adherencia entre el hierro y el concreto, efectuadas en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Universidad Católica

P O R

MIGUEL LETELIER

Entre las numerosísimas experiencias que en tantos centros e institutos de investigación, y por tantos profesores, ingenieros y constructores, ha sido objeto el material concreto armado en sus diversas solicitaciones, los encaminados a investigar las cifras que definen la adherencia entre ambos materiales, forman sin duda un tanto por ciento reducido.

La comprobación y revisión experimental de las cifras generalmente admitidas y recomendadas en los pliegos de condiciones y textos usadas corrientemente por los proyectistas y constructores, lejos de perder su oportunidad, mantiene en todo momento su interés, principalmente cuando el progreso y diversidad de fabricación de los materiales que la industria entrega al comercio, hace variar aquellas cifras tanto o más que los procedimientos o la destreza manual de quienes los ponen en obra.

Entre nosotros, el empleo muy plausible y justificado de los buenos cementos nacionales, en las construcciones de concreto armado, y el uso discreto del hierro relaminado en el país, no ha sido precedido ni seguido de experiencias científicas suficientes para comprobar si son o no aplicables las normas que prescriben los pliegos de condiciones extranjeros más frecuentemente observados aquí.

Para arrimar un grano de arena a aquella necesaria revisión experimental, hemos ejecutado en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Universidad Católica de Santiago, de nuestro cargo, las experiencias de adherencia que motivan esta relación, y que entregamos sin generalización ni comentario alguno al examen y consideración de ingenieros y constructores.

*
* *

Las muestras usadas en nuestras experiencias eran prismas de concreto, de 0.20 y 0.20 mts. y de 0.25 mts. de altura, atravesadas entre dos caras paralelas,

según su eje mayor por una barra de hierro de 0.0254 mts. (1'), en unas series y de 0.0127 (1/2') en otras. (Véase fig. 1); sobre esta barra se aplicaba el esfuerzo F

de tracción, gradualmente creciente, hasta deslizarla y arrancarla del interior del prisma.

El concreto usado en la confección de los dichos prismas era de las siguientes proporciones:

Serie A:

Concreto 1 : 1 : 2 correspondiente a una dosificación de 606 kgs. de concreto por mt^3 , 380 lts. de arena y 770 lts. de ripio.

Serie B.

Concreto 1 : 2 : 4 según la siguiente dosificación: 350 kgs. por mt^3 , arena 440 lts., ripio 880 lts.

Serie C; concreto 1 : 3 : 6, según la siguiente dosificación: cemento 245 kgs.; por mt^3 , arena 470 lts., ripio 940 lts.

El cemento empleado era de procedencia nacional, de la fábrica "El Melón", obtenido en el comercio en las condiciones corrientes en que se expende este material, en sacos de 57 kgs. de peso. Ensayadas sus propiedades físicas conforme a los procedimientos clásicos, para tener las indicaciones exigidas por el pliego de condiciones de la Dirección de Obras Públicas de Chile, se obtuvieron los resultados siguientes: (1)

Cantidad de agua necesaria para obtener pasta normal 32°

Constancia de volumen: buena.

Cernido:

Residuo en el tamiz de 324 mallas por ctmt.	$\square$	0,3°
" " " 900 " por ctmt.	$\square$	1,2°
" " " 4900 " por ctmt.	$\square$	14,8°

Duración del fraguado (no se determinó).

(1) Tanto estos ensayos, como la preparación del concreto y confección de los cubos ensayados, los debemos a los jóvenes estudiantes Alfredo Lagarrigue Rengifo y Julio C. Escobar, quienes los efectuaron en el Laboratorio de nuestro cargo antes nombrado, con motivo de la preparación de su interesante tesis «Coeficiente de Elasticidad del Concreto» y que han tenido la amabilidad de ayudarnos en la forma indicada, en estas experiencias. Repetimos desde estas columnas nuestros agradecimientos por su utilísima cooperación.

Resistencia.

A la tracción (pasta normal):

A los 7 días	—————	26.56 kgs. por cm^2
„ „ 28 „	—————	41.59 „ „ „

Compresión (mortero normal)

A los 7 días	—————	109 kgs. por cm^2
„ „ 28 „	—————	204 „ „ „

La arena empleada provenia del río Mapocho; pasaba toda por el tamiz de 5 m_m de diámetro, y fué lavada convenientemente hasta obtener menos de 2% de arcilla en el ensayo de la probeta. Correspondia por su calidad a la buena arena que es dable obtener en construcciones cuidadas en Santiago.

El ripio (cantos rodados) provenia también del río Mapocho; sus dimensiones estaban comprendidas entre 5 y 25 m_m ; fué lavado cuidadosamente, aún cuando venia ya en condiciones de limpieza satisfactoria.

El hierro empleado en las barras longitudinales y en las armaduras transversales en los prismas que las tenían, era material relaminado en el país en el establecimiento de la "Sociedad Metalúrgica Nacional". Eran barras redondas de 2.54 de 1.27 y 0.75 centímetros de diámetro, provenientes de paquetes de hierro viejo, calentado convenientemente y pasado por el laminador. Su aspecto exterior era satisfactorio, tanto en su contextura, como en su calibre admisiblemente uniforme; no tenía ni grietas, ni fallas aparentes.

Sus características de resistencia eran las siguientes:

Resistencia máxima 32 a 38 kgs. por centímetro cuadrado.

Alargamiento $\%$ (medido sobre 200 m_m) 22 a 24%

Límite aparente de elasticidad, 24.5 a 28.5 kgs. por milímetro cuadrado.

*
* *

Los cubos por ensayar fueron preparados en el patio del Laboratorio, en moldes de madera cuidadosamente dispuestos. El cemento fué mezclado a mano, en condiciones satisfactorias de batido, procurando la mayor semejanza posible con el modo frecuente de empleo en las construcciones corrientes de concreto armado.

Los diversos cubos se mantuvieron por tres días en sus moldes, cuidando que tuvieran en todo momento la humedad necesaria para un buen fraguado. Una vez sacados de sus moldes se mantenían por tres días sumergidos en agua, excepto la serie B, que solamente estuvo dos días en ese medio. En seguida fueron guardados al abrigo de la intemperie al interior de una sala, donde se les humedecía conve-

nientemente. Allí se mantuvieron las diversas series hasta completar 90 días de edad, época en que fueron ensayados en la forma que más abajo indicamos.

Cada serie A B y C constaba de 12 muestras divididos en grupos de las características siguientes:

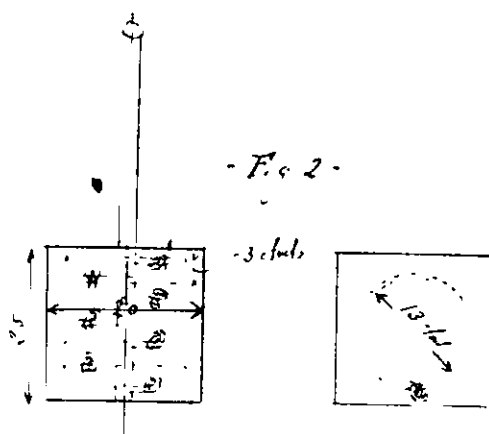
1 : 3 prismas armados longitudinalmente por una barra de 0,0254 mts. de diámetro, y sin armadura transversal.

2 : 3 prismas análogos a los anteriores y a más armados transversalmente de 7 anillos de 13 ctmts. de diámetro, de hierro redondo de 7.5 m, m de diámetro, espaciados del modo como lo indica la figura 2.

3): 3 prismas armados longitudinalmente por una barra de 0,0127 de diámetro, sin armadura transversal; y

4): 3 prismas armados longitudinalmente como el grupo 3 y con armaduras transversales conforme al grupo 2.

Los ensayos se efectuaron en una máquina de tracción de Amsler y Laffon

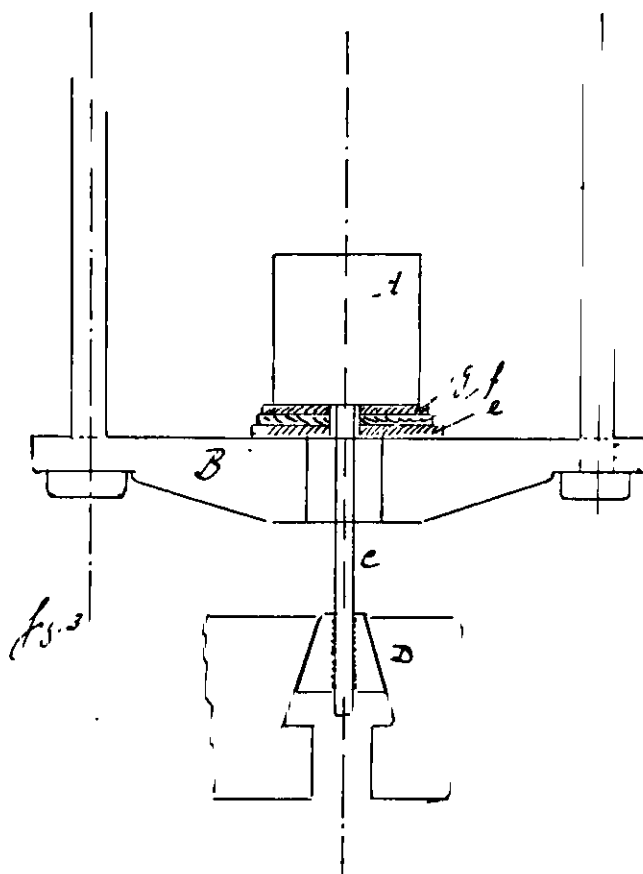


disponiendo la muestra como lo indica la figura 3. Sobre la mesa móvil B de la máquina se colocaba el prisma por ensayar A; el vástago C cuya resistencia a la adherencia se quería experimentar, atravesaba la cavidad central de la mesa y era tomado inferiormente por las garras D, del marco fijo de la máquina. El esfuerzo F era registrado en todo instante del ensayo por el cuadrante indicador de la máquina. Entre el prisma y la mesa móvil se interponían tres placas e, f y g; la primera e, de acero para contener el prisma, la segunda f, de madera blanda (álamo) y la tercera g de fieltro, las dos últimas para repartir uniformemente el esfuerzo sobre la cara inferior de la muestra y evitar toda flexión.

Estando las cosas así dispuestas se iniciaba la experiencia, cuidando de llevarla lo más lentamente posible para observar y anotar todas las incidencias y detalles que presentasen; ellas y las diversas cifras de resistencias se encuentran resumidas en los cuadros números 1, 2 y 3.

Es interesante referir las diversas fases de un ensayo, y ello nos servirá para

explicar el significado de las anotaciones, cuya exégesis es imprescindible fijar. Tomaremos por ejemplo la muestra B₄. Colocada la muestra sobre la máquina de ensayos en la forma más arriba descrita e iniciado el funcionamiento de ésta, el esfuerzo de tracción indicado en el cuadrante subía con regularidad y sensible rapidez, en todo semejante con el crecimiento del esfuerzo en el período elástico del ensayo de una barra metálica; la velocidad de la máquina de tracción la habíamos graduado en la forma acostumbrada en estos ensayos. Ningún desplazamiento de



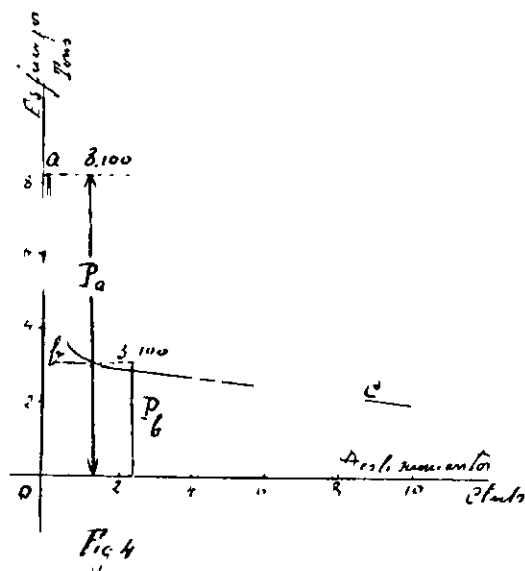
la armadura con respecto al concreto se hacía notar en esta primera faz; cabría asegurar que no había otros desplazamientos que los permitidos por los alargamientos elásticos de la parte exterior de la barra de la armadura. El esfuerzo de tracción alcanzó de esta manera hasta 8 100 Kgs. que corresponde a un esfuerzo por unidad de superficie de contacto entre el concreto y la armadura, de 40,7 Kgs. por centímetro cuadrado.

Súbitamente la aguja indicadora del esfuerzo cayó con rapidez, aún podía mos decir bruscamente hasta 3100 Kgs., el deslizamiento de la armadura con respecto al concreto se había iniciado, la adherencia propiamente tal se había roto.

Sin embargo, una vez descendido hasta los dichos 3100 Klg. el esfuerzo se mantenía casi constante a pesar que la barra continuaba deslizándose, y sólo declinaba en seguida con marcada lentitud. Estos deslizamientos bien sensibles y que hicimos llegar hasta 100 milímetros o más, no producían desagregación alguna en el concreto y las paredes de la cavidad que alojaba a la armadura se presentaban perfectamente lisas y regulares una vez retirada ésta.

El diagrama de los esfuerzos y deslizamientos, tienen el aspecto que indica la figura 3.

Los puntos *a* y *b* del diagrama son característicos; el primero indica el punto de cesación de la adherencia, origen de los deslizamientos del concreto y la armadura; el punto *b* parece indicar el origen de una segunda manera de resistir contra



el esfuerzo de deslizamiento, distinta de la primera e inferior a ella en la diferencia de ordenada de los puntos *a* y *b*.

La regularidad y semejanza con que esta manera de resistir se ha presentado en cada uno de los 36 ensayos efectuados, con excepción sólo de aquellos en que las muestras se han quebrado, nos ha inducido a anotar cuidadosamente las ordenadas P_a y P_b de los puntos *a* y *b*. La primera indica el esfuerzo que rompe la adherencia.

Esto nos ha hecho recordar la explicación que dan algunos autores al fenómeno de la adherencia entre el hierro y el concreto; se debería a dos causas una química y física la otra.

Sería la primera, la formación al rededor de la armadura de una costra delgada de silicatos y aluminatos de hierro y ferratos cálcicos que realizan una soldadura eficacísima entre ambos elementos hormigón y armadura, formación facili-

tada por el íntimo contacto del hierro con una envoltura de mortero rico en cemento, que el pisoneo facilita a formar mientras más enérgicamente se ejecuta y más fluido sea aquél. Esta causa de la resistencia de adherencia estaría medida por la ordenada P_a .

La segunda causa sería la fuerte presión que han de experimentar las armaduras por efecto de la contracción del concreto durante su fraguado y endurecimiento; esta presión origina un frotamiento enérgico toda vez que la armadura es solicitada a deslizar y a desplazarse con respecto al concreto. Esta segunda causa de resistencia de adherencia sería la representada por la rama bc del diagrama de la figura 4 y la ordenada P_b , indicaría el valor máximo de su valor; por eso en los cuadros números 1, 2 y 3 designamos la columna de estos valores por «resistencia debida al frotamiento». En efecto, habiendo ya deslizada la armadura y rótese toda íntima unión de ambos materiales, no subsiste otra causa de una resistencia tan efectiva como la que aún opone al deslizamiento, que el frotamiento.

Conviene observar que la presencia de las armaduras transversales en las muestras ensayadas, tenían, a nuestro juicio, una acción mucho más limitada que aquella efectivamente desempeñada por dichas armaduras en las construcciones comunes; en éstas, su mayor proximidad a las armaduras longitudinales y su disposición, han de aumentar sin duda la resistencia de adherencia de éstas; así lo han demostrado además, numerosas experiencias al respecto. En las que aquí describimos, no han desempeñado las armaduras transversales otra acción que impedir la quebradura de las muestras; en aquellas sin armaduras transversales que no se han quebrado prematuramente, la resistencia θ_a no ha sido muy inferior, y en algunos casos ha sido superior (?) a la constatada en los prismas con armaduras transversales. No es posible, a nuestro juicio, fundar en estos ensayos conclusión alguna respecto a la presencia de éstas.

Determinando el promedio de las resistencias θ_a y θ_b de cada serie, después de eliminar aquellas experiencias que manifiestan evidentes anomalías, obtenemos las cifras siguientes:

Fatigas de ruptura de adherencia θ_a y resistencia unitaria debida al frotamiento θ_b :

Concreto. 1 : 1 : 2.

Muestras con armaduras de 2.54 ctms. de diám. $\theta_a = 40.9$ Kgs. por cm^2

•	•	•	•	•	$\theta_b = 15$	•	•
•	sin	•	1.27	•	$\theta_a = 33.6$	•	•
•	•	•	•	•	$\theta_b = 13.1$	•	•

Concreto. 1 : 2 : 4 :

Muestras con armaduras de 2.54 ctms. de diám	$\theta_a = 34.8$	»
» » » » »	$\theta_b = 11.4$	»
» » 1.27 » »	$\theta_a = 32.3$	»
» » » » »	$\theta_b = 11.1$	»

Concreto. 1 : 3 : 6.

Muestras con armaduras de 2.54 ctms. de diám	$\theta_a = 21.9$	»
» » » » »	$\theta_b = 9.8$	»
» » » 1.27 » »	$\theta_a = 28.7$	»
» » » » »	$\theta_b = 9.3$	»

Las cifras anteriores no permiten deducir conclusión alguna acerca de si la resistencia de adherencia y de frotamiento sea influenciado por el diámetro de la armadura; pareciera según el resultado de estas experiencias que no hay diferencia apreciable entre las resistencias obtenidas con armaduras de sección circular de 2.54 o 1.27 centímetros de diámetro.

Las muestras ensayadas, confeccionadas sin cuidado especial alguno para aumentar la resistencia de adherencia, procurando asemejarse en todo a lo que es uso y costumbre en las construcciones de concreto armado nos permiten asegurar, dadas las cifras medias últimamente anotadas, que las fatigas limite practicamente observadas que fluctúan de 4 a 5 kgs. por centímetro cuadrado de superficie adherente, tienen un coeficiente de seguridad efectiva y suficiente, con cuya realidad puede contarse en las condiciones corrientes de las buenas construcciones aquí ejecutadas. Esas resistencias son aún inferiores a la resistencia unitaria debido al frotamiento constatado en estas experiencias.

Aún sería permitido afirmar que la fatiga de adherencia de 4 a 5 kgs. por cm^2 clásicamente prescrita en los pliegos de condiciones, debe ser todavía materia abierta al estudio y a la experimentación que haya de servir de base a los nuevos pliegos de condiciones a que hayan de someterse las construcciones de concreto armado.

Serie A. concreto 1:1:2

Designación de la muestra	Diámetro de la armadura longitudinal d cms.	Supl. de adherencia $w_a = \pi \cdot d \cdot l = 25 \text{ cm.}$ ctms.?	Esfuerzo que rompe la adherencia P_a Kgs.	Fatiga de ruptura de adherencia $\frac{P_a}{w_a} = \frac{P_a}{\pi \cdot d}$ Kgs. por cm. $\square$	Resistencia debida al frotaamiento			Edad de la muestra Días	Armaduras transversales	OBSERVACIONES
					Total P_b Kgs.	Unitaria $\frac{P_b}{w_a} = \frac{P_b}{\pi \cdot d}$ Kgs. por cm. ²				
						P_b	$\frac{P_b}{w_a}$			
A 1	2.54	198.39	9 100	45,8	2 000	10.	90	7 anillos de 13 centímetros de diámetro, de hierro de 7.5 milímetros, espaciados de 3 ctms	Una desviación local de la armadura influenciaba el esfuerzo P_b y o llevaba a 6800 kgs. no debido solamente al frotaamiento.	
A 2	"	"	8 100	40,8	6 800	34.3	"			
A 3	"	"	8 000	40,3	4 000	20.	"			
A 4	"	"	9 240	46,5	?	—	"	Sin armaduras transversales	A 9 240 Kgs. el prisma se partió según un plano vertical.	
A 5	"	"	7 800	39,4	?	—	"			
A 6	"	"	6 550	33,	?	—	"			
A 7	1.27	99.69	3 650	36,6	1 400	14.	"	7 anillos de 13 centímetros de diámetro, de hierro redondo de 7.5 milímetros, espaciados de 3 centímetros.	A 3 560 Kgs. la armadura longitudinal llegó a su límite de elasticidad. P_b se manifestó con precua elasticidad.	
A 8	"	"	3 380	33,8	1 900	19.	"			
A 9	"	"	2 500	25,			"			
A 10	"	"	1 800	18,	550	5.	"	Sin armaduras transversales	A 3 400 Kgs. armadura longitudinal llegó al límite de elasticidad.	
A 11	"	"	3 750	37,6	1 400	14.	"			
A 12	"	"	3 500	35,1	1 150	11.5	"			A 3 300 Kgs. la armadura longitudinal llegó al límite de elasticidad.

CUADRO N.º 2

Serie B. Concreto 1 : 2 : 4

Designación de la muestra	Diámetro de la armadura longitudinal d. cms.	Supe. de adherencia $\pi d l$; $l = 25$ cms.	Fuerzo que rompe la adherencia P. A. Kgs.	Fatiga de ruptura de la adherencia $\sigma_a = \frac{P_a}{P_a}$ Kgs. por cm^2	Resistencia debida al frotamiento		Edad de la muestra Días	Armaduras transversales	OBSERVACIONES
					Total $= P_b$ Kgs.	Unitaria $= \frac{P_b}{\sigma_a}$ Kgs. por cm^2			
B ₁	2.54	198.39	5 250	26,4	2 550	12.8	30	7 anillos de 13 centímetros de diámetro, de hierro redondo de 7.5 milímetros espaciados de 3 cms.	A. 6 940, antes que se observaran deslizamientos en la barra, el prisma se quebró verticalmente. A 5 000 Kgs. el prisma se partió y el esfuerzo descendió bruscamente a 2 050 Kgs. A 3 300 Kgs. las oscilaciones de la aguja indicadora de los esfuerzos acusaba haberse producido el límite de elasticidad de la armadura; la fatiga del metal, era de 25 18 Kgs. por milímetro cuadrado. En seguida el esfuerzo continuó creciendo hasta 3 420 Kgs. Como en B ₇ el límite de elasticidad de la armadura se produjo a 3 100 Kgs. antes que la armadura deslizará. Lim. de elast. de la armadura a 3 120 Kgs. antes de deslizar. Lim. de elast. de la armadura a 3 100 Kgs. antes de deslizar.
B ₂	"	"	7 200	36,2	1 060?	5.32	90		
B ₃	"	"	7 100	35,7	2 400	12.2	"		
B ₄	"	"	8 100	40,7	3 100	15.6	"		
B ₅	"	"	6 940	35	—	—	"	Sin armadura transversal.	
B ₆	"	"	5 000	25,2	—	—	"		
B ₇	1.27	99.69	3 420	34,3	1000 aprox.	10	"		
B ₈	"	"	3 200	32	1 050	10.5	"	Sin armadura transversal.	
B ₉	"	"	3 440	31.85	1 600	16.05	"		
B ₁₀	"	"	3 090	30.95	1 100	11.05	"	7 anillos de 13 centímetros de diámetro, de hierro redondo de 7.5 milímetros, espaciados de 3 centímetros.	
B ₁₁	"	"	3 270	32,75	1 100	11.05	"		
B ₁₂	"	"	3 200	32	800	8	"		

Serie C. Concreto 1: 3: 6

Designación de la muestra	Diámetro de la armadura longitudinal	Supl. de adherencia $w_a = \pi \cdot d \cdot l = 25 \text{ cms.}$	Esfuerzo que rompe la adherencia P_a Kgs.	Pérdida de adherencia $\frac{P_a}{P_b} = \frac{P_a}{P_b}$	Resistencia debida al frotamiento		Edad de la muestra	Días	Armaduras transversales	OBSERVACIONES
					Total	Unitaria $\frac{P_b}{w_a}$ Kgs. por cm.^2				
C ₁	2.54	198.39	4 450	22.4	2 100	10.6	90		7 anillos de 13 centímetros de diámetro, 1 de hierro redondo de 7.5 milímetros, espaciado de 3 centímetros.	El elevado valor P_b se debía a la acción local de un guiñaro que produjo un frotamiento exagerado lo que constató al romper la muestra.
C ₂		"	5 200	26.2	4 500	22.7	"			
C ₃	"	"	3 600	18.1	1 400	7.	"			
C ₄	"	"	4 900	24.6	1 200	6.	"			
C ₅	"	"	4 300	21.6	1 400	7.	"		Sin armaduras transversales.	
C ₆		"	3 700	18.6	1 200	6.	"			
C ₇	1.27	99.69	2 850	28.55	1 600	16.	"		7 anillos de 13 centímetros de diámetro, 1 de hierro redondo de 7.5 milímetros, espaciados de 3 centímetros.	P_b muy netamente definido.
C ₈		"	2 250	22.55	500	5.	"			
C ₉	"	"	2 450	24.5	500	5	"			
C ₁₀	"	"	3 380	34.	900	9.	"			Límite elasticidad de la armadura se produjo a 3,300 Kgs: aún no debió.
C ₁₁	"	"	3 100	31.	1 000	10.	"		Sin armadura transversal.	A 3,100 Kgs. se partió el prisma.
C ₁₂	"	"	3 200	32.4	1 100	11.	"			A 3,180 la armadura llegó al límite de elasticidad; aún no se produjo desdoblamiento.