

EL ENSAYO DE FLEXOTRACCION Y EL ENSAYO DE HENDIMIENTO DEL HORMIGON

Moisés PIÑEIRO*
Sergio VALENZUELA**
José GENTA***

RESUMEN

Se da cuenta de investigaciones mediante las cuales se analiza la posibilidad de controlar la resistencia a la tracción del hormigón por medio de la resistencia de hendimiento.

Se fabricaron hormigones con tres tipos de gravas, y con resistencias entre amplios márgenes. Se determinaron las resistencias a compresión, cilíndricas y cúbicas, las resistencias de flexotracción y de hendimiento, y se midieron además los respectivos módulos de Young, estático y dinámico, y de rigidez dinámico.

Se presentan diferentes correlaciones entre las citadas características y las resistencias de flexotracción y de hendimiento, pudiéndose observar a través de ellas que la resistencia de flexotracción posee mayor sensibilidad que la de hendimiento ante el cambio del tipo de grava. La relación entre las resistencias de flexotracción y de hendimiento queda influida significativamente por el tipo de grava empleado.

Se discuten los resultados y se comparan con los obtenidos por otros investigadores.

INTRODUCCION

En variados casos, pero sobre todo en los de obras hidráulicas y viales, el conocimiento de la resistencia a la tracción del hormigón es de gran importancia. Estas condiciones plantean un problema serio cuando por las características de la obra conviene establecer un control rutinario. Ello significa gran cantidad de ensayos y, si cada uno de éstos es complicado, puede que finalmente todo el control se termine haciendo a través de un ensayo sin pro-

* Ingeniero del IDIEM. Sección Investigación de Hormigones.

** Ingeniero civil. Ferrocarriles del Estado.

*** Ingeniero civil. Ministerio de Obras Públicas.

blemas como es el de compresión. Esta decisión se ha tomado en muchos casos, pese a que la resistencia a la compresión no es un buen índice de la resistencia a la tracción.

Si la resistencia a la tracción se pudiera inferir mediante un ensayo sencillo que no necesitara de una probeta especial o de manejo incómodo, esto permitiría salvar los inconvenientes señalados. El ensayo de hendimiento reúne estas características, pues utiliza el cilindro de 30 cm de alto y 15 cm de diámetro. Pero para que llegue a usarse en ensayos de rutina se necesita resolver varias interrogantes relativas especialmente al significado y alcance del resultado de este ensayo en el caso del hormigón.

En varios países se han publicado trabajos teóricos y experimentales sobre el ensayo de hendimiento; ellos desgraciadamente no han agotado todas las dudas y quedan aún diversos puntos por dilucidarse. Ya que en la mayor parte de las especificaciones de resistencia para calzadas y losas de aeropuerto se indican valores límites de resistencias de flexotracción, al tratar el ensayo de hendimiento es casi obligado considerar también el de flexotracción como primer paso para estudiar la posibilidad de utilizar uno u otro, indistintamente, en los ensayos de rutina. Esta es la razón de que en el presente trabajo se traten paralelamente ambas resistencias.

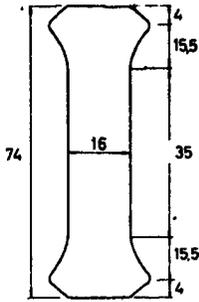
La presente investigación se proyectó con el fin de obtener en lo inmediato información que facilite el control del hormigón de la zona de Santiago. Como objetivo también de interés pero no tan inmediato, estaba el obtener aclaración sobre algunos puntos relacionados con la utilización en la práctica del ensayo de hendimiento: estudiar la influencia del tipo de árido y examinar la interdependencia de las diferentes variables consideradas.

ANTECEDENTES

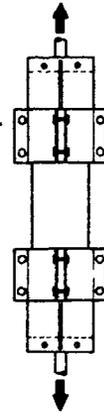
La razón de que se piense siempre en determinar la resistencia a la tracción por medios indirectos, especialmente si se trata de ensayos de rutina, obedece a que el ensayo de tracción directa, aunque es factible, es difícil y complicado de realizar. Esto continúa siendo así en la actualidad pese a que el problema se ha simplificado mucho gracias al empleo de adhesivos a base de resina. En la Fig. 1 hemos indicado diversas disposiciones que se han utilizado para medir la resistencia a la tracción pura del hormigón.¹⁻⁴

Sobre el ensayo de flexotracción existe bastante experiencia e información; el ensayo de hendimiento, en cambio, sólo ha comenzado a estudiarse más recientemente.

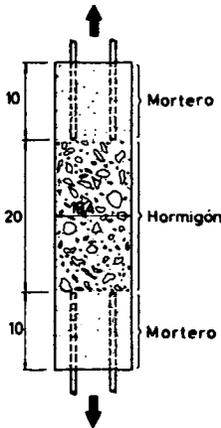
El ensayo de hendimiento, como procedimiento para determinar la resis-



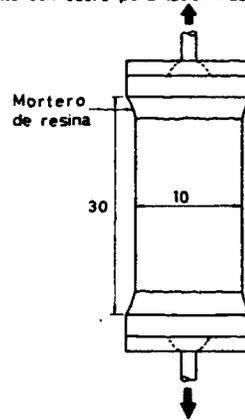
c) Antigua probeta de tracción alemana, las cabezas servían para agarrarla en la máquina de ensayo



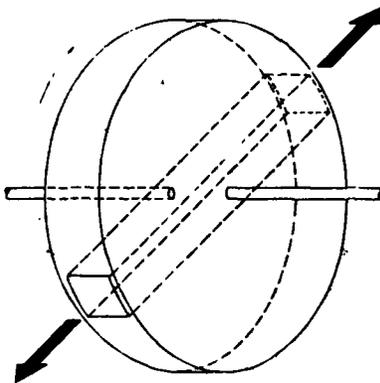
b) Disposición empleada por Gonnerman y Shuman. Las probetas eran cilindros de 15 cm de diámetro y alturas de 30, 45, 60 y 90 centímetros. Las abrazaderas de agarre de las probetas estaban torradas interiormente con cuero para hacer más uniforme la presión.



c) Probeta del Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Portugal. El mortero ubicado en el extremo está reforzado con barras de alambre que sobresalen y que sirven para agarrar la probeta en la máquina de ensayo.



d) Disposición empleada actualmente en diversos laboratorios y también en el IDIEM. Los extremos de la probeta se han pegado a las placas de acero mediante resina epóxica, esa zona se ha reforzado además mediante un mortero a base de resina.



e) Tracción producida en la probeta mediante la fuerza centrífuga. Ensayo ideado por Berthier. La tensión de tracción se calcula midiendo la velocidad de giro y el peso

$$\sigma_t = 1,77 \cdot 10^{-9} \cdot N^2 \cdot P$$

P = peso probeta en gramos
N = velocidad de rotación en vueltas / min.

Fig. 1. Diversas disposiciones adoptadas para medir la resistencia a la tracción pura del hormigón.

tencia a la tracción del hormigón fue propuesto separadamente en Brasil y Japón, por F. Carneiro (septiembre de 1943) y T. Akazawa (noviembre de 1943) respectivamente⁵. El punto de partida de la experiencia brasileña fue el interés de utilizar como rodillos barriles de fundición, llenos de hormigón, para desplazar sobre ellos una antigua iglesia en la ciudad de Río de Janeiro. De este problema derivó la necesidad de conocer la capacidad resistente de rodillos cilíndricos de hormigón solicitados por compresión diametral. Los mismos investigadores anotados publicaron posteriormente, en 1953, sus trabajos en una revista de mayor difusión internacional incluyendo algunas investigaciones de laboratorio sobre el particular⁶⁻⁷. Desde 1953 hasta ahora se ha publicado gran cantidad de investigaciones sobre este asunto, y en el último tiempo instituciones importantes lo han normalizado⁸⁻⁹.

DESCRIPCION DE LAS EXPERIENCIAS

Para reunir la información necesaria para el estudio, se fabricaron hormigones de diferentes resistencias empleando un mismo tipo de arena y tres gravas diferentes. Las diferentes resistencias se obtuvieron variando la razón agua-cemento entre 0,30 y 1,10; para lograr razones agua-cemento tan extremas fue necesario variar la cantidad de cemento. La arena, entregada por una fábrica de material chancado, y dos de las gravas, una rodada y otra chancada, provenían de la zona de Santiago. Se trata de materiales silíceos, predominantemente graníticos y volcánicos andesíticos. La otra grava era una caliza proveniente de la zona de Polpaico que se utilizó chancada. El tamaño máximo de la grava se mantuvo en 1½". Debido a la gran cantidad de hormigón que fue necesario preparar a lo largo de toda la experiencia, el acopio de arena debió renovarse; se emplearon en total cuatro granulometrías diferentes para la arena.

La granulometría de cada una de las gravas se mantuvo constante y dentro de los límites aconsejados por la norma ASTM C 33 - 64¹⁰. En la Tabla I se da un resumen de las características físicas de los áridos empleados.

Se estimó que las correlaciones que interesaban, aun aquéllas que tuvieran mayor dispersión, se podrían definir razonablemente con unos cincuenta puntos. Con el fin de no ejercer influencia ni en la ordenación de los puntos ni en la secuencia con que se fueran fabricando las diversas coladas, las razones agua-cemento correspondientes se obtuvieron por muestreo al azar¹¹.

El ensayo de compresión se hizo utilizando una máquina de compresión Losenhausenwerk de 300 t. La resistencia cúbica se determinó en cubos de

TABLA I

CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS ARIDOS EMPLEADOS

	Módulo de finura	Densidad aparente mat. asent. kg/dm ³	Peso específico	Absorción %
Arena	2,6 - 2,8	1,72 - 1,94	2,68 - 2,72	1 - 2
Grava rodada	—	1,70	2,67	0,3
Grava silícea chancada	—	1,56	2,66	0,6
Grava caliza chancada	—	1,52	2,64	1,4

20 cm de arista siguiendo las instrucciones de la norma DIN 1048¹²; la resistencia de compresión cilíndrica se determinó en probetas de 15 cm de diámetro por 30 de altura, siguiendo la norma ASTM C 39 - 59¹³. Las caras de los cilindros se rectificaron mediante una mezcla fundida - a 150 °C - de azufre y arcilla en relación 3 : 1.

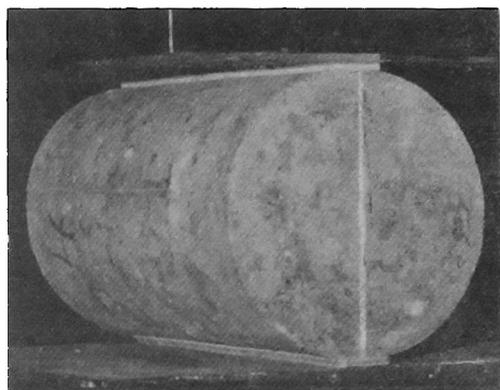


Fig. 2. Vista de un cilindro ya ensayado al hendidamiento.

El ensayo de hendidamiento se hizo en probetas cilíndricas análogas a las utilizadas para la compresión y en la misma máquina de ensayo (Fig. 2); se siguieron en este caso las instrucciones de la norma ASTM C 496 - 64 T°. El diámetro medio del cilindro se calculó promediando tres lecturas: dos efectuadas en los extremos y una en el centro, todas conteniendo las generatrices de carga; la altura se obtuvo promediando las longitudes de estas

generatrices.

La determinación del módulo estático se hizo en la misma máquina utilizada en el ensayo corriente de compresión, y para medir las deformaciones se utilizó un dial de precisión asociado a un dispositivo amplificador análogo al que se indica en Fig. 3.

El ensayo de flexotracción se efectuó según las indicaciones de la norma ASTM C 78 - 57¹⁴ mediante la aplicación de dos cargas iguales en los tercios de la luz. Se utilizó una máquina Amsler de 60 t. La luz de ensayo para las viguetas se mantuvo en 45 cm. Para efectuar el ensayo se colocaba la probeta apoyada sobre una de las caras normales a la de llenado (Fig. 4). La carga se aplicó mediante dos rodillos de 1,5 cm de diámetro, distantes entre sí 15 cm,

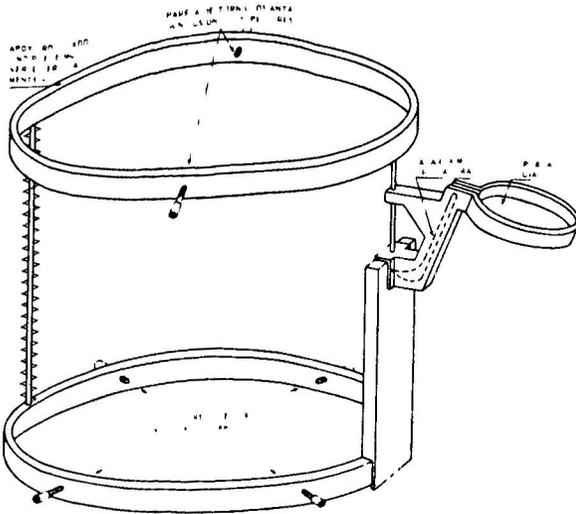


Fig. 3. Dibujo esquemático del dispositivo utilizado para medir deformaciones en el cilindro de hormigón.

que se hacían coincidir con los tercios de la luz. Antes del ensayo, las viguetas fueron auscultadas para determinar sus frecuencias de resonancia, longitudinal y torsional, con el fin de deducir posteriormente las constantes elásticas del hormigón.

Para medir las frecuencias longitudinales y torsionales se siguieron las instrucciones de la norma ASTM C 215 - 60¹⁵. El aparato empleado para auscultar las viguetas fue un Electro Dynamic Tester Type SCT MK III Serie N° 30, de procedencia inglesa, fabricado por A. E. Caw-kell. (Fig. 5).

Para cada tipo de ensayo se destinaron las siguientes probetas: compresión cúbica, 2; compresión cilíndrica, 2; hendimiento, 3; módulo estático, una probeta en un comienzo y posteriormente 2; flexotracción, 3, y frecuencia de resonancia, 3.

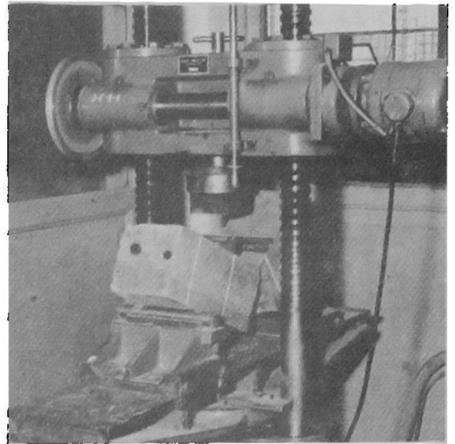


Fig. 4. Ensayo de flexotracción.

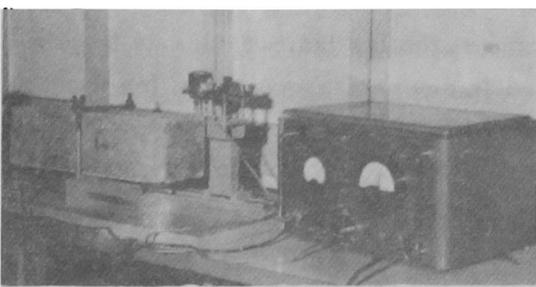


Fig. 5. Equipo utilizado para medir la frecuencia de resonancia. En la vista puede observarse la disposición adoptada para medir la frecuencia fundamental torsional. En el extremo superior derecho de la viga está ubicada la unidad excitadora. Al lado derecho de la foto el equipo indicador.

La tensión de rotura por flexotracción se calculó mediante la fórmula:

$$R_f = \frac{P l}{a b^2}$$

donde P es la carga de rotura y l , a y b , la luz, el ancho y el alto de la viga respectivamente. Esta fórmula se aplica si la rotura se produce dentro del tercio central; si la rotura se produce fuera del tercio central, pero dentro de una longitud del 5% de l contado a partir de los bordes del tercio, se emplea la expresión:

$$R = \frac{3 P c}{a b^2}$$

donde c es la distancia entre la línea de fractura y el apoyo más cercano de la vigueta, medida a lo largo del eje central de la cara inferior empleada durante el ensayo. Si la rotura se produce fuera de estos márgenes, el ensayo se desecha.

La tensión de tracción medida a través del ensayo de hendimiento se calcula según la expresión:

$$R_b = \frac{2 P}{\pi b d}$$

donde P es la carga de rotura, b la altura del cilindro y d el diámetro.

En el caso de la determinación del módulo estático, una vez obtenidas las deformaciones unitarias se dibujaron las curvas tensión - deformación. De estos gráficos se calculó el módulo estático de elasticidad.

Se empleó para el cálculo la fórmula:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - 0,000050}$$

donde σ_1 = tensión de compresión correspondiente a una deformación unitaria de 50×10^{-6} .

σ_2 = tensión de compresión a un 50% de la carga de rotura.

ϵ_2 = deformación unitaria correspondiente a la tensión σ_2

No se dio a σ_2 el valor de la tensión de rotura del hormigón, como recomienda la norma ASTM C 469 - 65¹⁶, por estimarse que el correspondiente a un 50% de dicha tensión se acerca más a las tensiones de trabajo del hormigón.

RESULTADOS E INTERPRETACION

En la Tabla II hemos tabulado los resultados de los ensayos y en las Figs. 6 a 13 los hemos representado gráficamente en diferentes correlaciones.

En las Figs. 6 y 7 se indican las regresiones entre R_f y R_b , respectivamente, con las razones agua - cemento. Como dato de interés conviene anotar que el coeficiente de variación medio del ensayo de flexotracción fue de 8,1% y el del ensayo de hendimiento de 6,7%. En la regresión relativa a flexotracción, la grava chancada silícea presenta un comportamiento claramente diferente al de las otras dos gravas (rodada silícea y caliza chancada); esto, en cambio, no ocurre en los resultados del ensayo de hendimiento. Aunque ambas regresiones son evidentes, en ellas los puntos aparecen distribuidos en una banda demasiado amplia, lo que insta a pensar que debe existir otro factor que está influyendo en las regresiones. Esta impresión de los autores no pudo ser confirmada con los datos disponibles.

En las Figs. 8 a 10 se indican las relaciones entre resistencia de flexo-

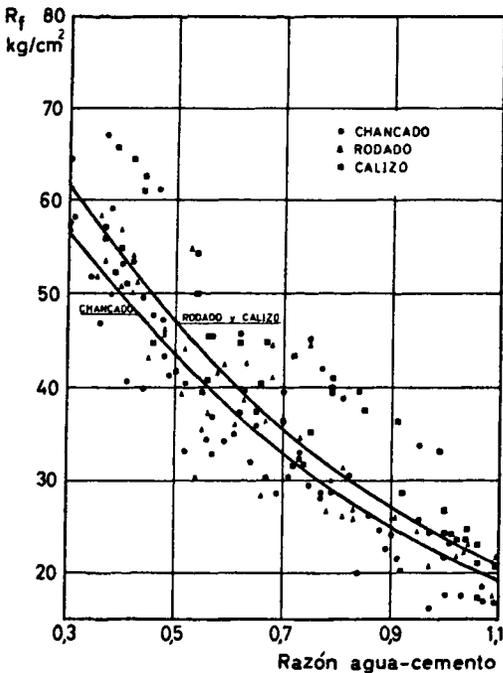


Fig. 6. Resistencia a la flexotracción función de la razón agua - cemento. Las curvas son significativamente diferentes.

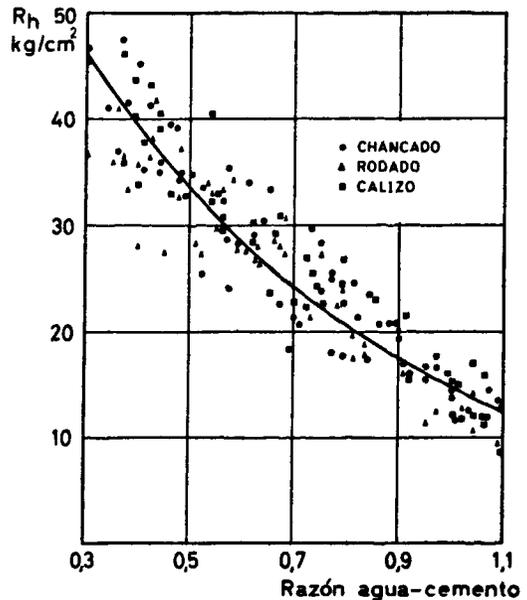


Fig. 7. Resistencia de hendimiento función de la razón agua - cemento. Los hormigones fabricados con las diferentes gravas dieron una línea de regresión única.

TABLA II
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

	Nº	A/C	R comp. cub. kg/cm ²	R comp. cil. kg/cm ²	R hend. kg/cm ²	R flex. kg/cm ²	E est. t/cm ²	E din. t/cm ²	G din. t/cm ²
a) Arido siliceo chancado	1	0,30	672	446	47	64	379	456	189
	2	0,30	582	443	45	58	204	440	184
	3	0,31	674	500	50	58	299	458	191
	4	0,34	539	346	41	52	354	432	184
	5	0,36	484	345	37	47	310	420	169
	6	0,37	664	532	48	67	378	457	188
	7	0,38	502	412	42	59	323	423	174
	8	0,40	536	377	45	53	328	417	168
	9	0,41	460	367	35	41	324	404	163
	10	0,42	481	408	41	54	337	409	168
	11	0,44	443	332	36	50	297	414	171
	12	0,44	412	340	35	40	288	384	159
	13	0,46	457	393	40	48	334	394	169
	14	0,47	494	408	39	62	275	440	174
	15	0,48	406	328	34	43	305	392	159
	16	0,48	408	348	35	47	298	—	—
	17	0,49	352	292	33	41	274	376	156
	18	0,52	380	310	34	41	305	364	154
	19	0,52	304	234	25	33	267	355	143
	20	0,56	310	236	32	35	290	350	147
	21	0,57	309	245	29	37	296	365	149
	22	0,57	258	205	24	33	240	347	141
	23	0,57	379	322	35	45	—	396	158
	24	0,59	302	260	28	34	275	345	136
	25	0,61	354	286	34	35	297	354	144
	26	0,62	300	246	29	46	269	396	165
	27	0,64	337	258	30	32	303	352	146
	28	0,65	320	282	33	36	264	347	144
	29	0,67	249	178	23	30	263	341	137
	30	0,69	184	140	18	28	245	319	121
	31	0,70	237	181	22	40	222	—	—
	32	0,71	248	196	21	30	228	—	—
	33	0,73	275	244	30	33	280	344	142
	34	0,75	238	180	24	30	281	340	140
	35	0,75	281	254	29	45	316	—	—
	36	0,77	230	182	26	29	229	333	133
	37	0,77	180	153	18	28	249	312	122
	38	0,77	242	212	26	42	236	—	—
	39	0,79	190	222	18	29	230	309	123
	40	0,81	230	222	25	39	225	350	143
	41	0,82	194	168	22	30	248	322	126
	42	0,84	146	108	18	20	183	282	118
	43	0,84	190	177	24	40	—	—	—
	44	0,86	185	148	21	26	216	318	128
	45	0,88	186	148	21	25	253	301	125
	46	0,89	174	152	20	23	233	295	124
	47	0,90	164	138	20	24	243	302	117
	48	0,91	140	131	17	22	253	279	108
	49	0,92	138	103	16	20	226	271	111
	50	0,95	146	114	17	26	188	320	125
	51	0,95	141	142	16	34	258	337	135
	52	0,97	152	140	18	25	232	288	119
	53	0,97	142	118	17	16	188	294	119
	54	1,00	128	102	14	22	185	279	113
	55	1,00	112	96	15	18	231	252	107
	56	1,01	119	106	12	24	—	277	105
	57	1,03	119	86	13	18	185	275	107
	58	1,07	124	106	15	18	203	286	117
	59	1,07	114	78	12	17	185	361	102
	60	1,09	115	93	14	17	140	257	102

TABLA II (continuación)
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

	Nº	A/C	R comp. cub. kg/cm ²	R comp. cil. kg/cm ²	R hend. kg/cm ²	R flex. kg/cm ²	E Est. t/cm ²	E din. t/cm ²	G din. t/cm ²
b) Árido silíceo rodado	1	0,30	512	355	37	57	400	442	182
	2	0,36	484	333	36	52	377	425	173
	3	0,36	514	430	41	58	386	436	178
	4	0,37	486	364	37	53	345	435	173
	5	0,38	434	308	33	50	367	434	176
	6	0,40	410	282	28	51	336	—	—
	7	0,40	399	326	36	57	331	432	174
	8	0,42	474	360	36	54	327	445	176
	9	0,42	472	399	38	50	330	—	—
	10	0,43	484	366	42	52	348	430	173
	11	0,45	388	298	27	43	334	—	—
	12	0,48	406	352	33	46	308	402	163
	13	0,48	390	358	37	46	338	407	165
	14	0,51	364	282	28	39	303	405	165
	15	0,52	339	268	27	44	279	375	151
	16	0,53	408	366	34	55	310	382	155
	17	0,54	382	294	33	30	346	359	146
	18	0,55	318	285	30	36	290	360	147
	19	0,56	364	289	34	37	307	376	159
	20	0,58	384	316	34	42	294	388	157
	21	0,59	324	262	28	42	304	381	152
	22	0,61	294	248	28	36	284	361	150
	23	0,63	260	258	27	40	288	367	147
	24	0,63	286	254	27	40	275	358	143
	25	0,63	324	258	28	42	276	383	153
	26	0,66	294	248	29	28	336	368	147
	27	0,67	266	244	28	37	273	361	144
	28	0,68	324	319	31	41	295	392	161
	29	0,68	266	190	27	45	313	—	—
	30	0,73	212	211	22	34	225	—	—
	31	0,75	255	230	27	45	264	354	144
	32	0,78	207	185	23	27	284	—	—
	33	0,79	194	177	24	30	248	329	132
	34	0,81	158	131	18	26	271	351	142
	35	0,81	185	184	20	32	236	368	144
	36	0,83	180	182	19	26	284	321	129
	37	0,83	176	152	18	27	265	330	130
	38	0,90	185	164	20	26	231	324	131
	39	0,91	161	166	16	26	281	—	—
	40	0,95	128	102	12	25	252	297	118
	41	0,97	140	104	13	21	248	312	132
	42	1,02	114	101	13	22	291	282	108
	43	1,04	135	120	15	23	288	316	127
	44	1,04	124	99	11	23	165	—	—
	45	1,09	84	77	10	17	147	259	100
	46	1,10	102	98	13	22	211	—	—
	47	1,11	84	76	11	19	172	246	97

tracción con resistencia a compresión cúbica, y resistencia de hendimiento con resistencia cúbica: en la primera de ellas el tipo de árido influyó dando regresiones significativamente diferentes; esto, en cambio, no ocurrió en la relación correspondiente al hendimiento. En el caso de estas figuras se eligió como referencia la resistencia a compresión cúbica, ya que ésta es la considera-

TABLA II (continuación)
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

	Nº	A/C	R comp. cub. kg/cm ²	R comp. cil. kg/cm ²	R hend. kg/cm ²	R flex. kg/cm ²	E est. t/cm ²	E din. t/cm ²	G din. t/cm ²
c) Arido calizo chancado	1	0,37	604	429	46	57	369	430	172
	2	0,37	482	336	36	56	314	397	163
	3	0,39	592	422	44	66	345	444	177
	4	0,39	500	376	40	53	359	412	165
	5	0,40	428	296	34	55	311	396	157
	6	0,41	404	259	38	51	305	389	158
	7	0,42	527	438	43	65	341	415	167
	8	0,44	496	307	39	63	—	425	169
	9	0,44	522	426	41	61	349	—	—
	10	0,46	366	294	33	45	295	357	147
	11	0,50	412	336	35	42	314	379	154
	12	0,54	444	330	40	54	322	405	157
	13	0,54	348	322	32	50	287	379	154
	14	0,55	380	312	33	40	341	373	150
	15	0,56	348	326	30	46	293	—	—
	16	0,56	396	304	31	41	308	364	149
	17	0,62	314	278	30	37	287	349	150
	18	0,62	308	310	29	45	299	365	149
	19	0,65	240	232	24	37	264	332	130
	20	0,66	273	343	29	41	262	344	136
	21	0,67	318	263	31	45	279	379	154
	22	0,70	250	222	23	36	231	—	—
	23	0,72	251	210	27	43	262	358	145
	24	0,72	274	218	22	32	282	339	135
	25	0,73	227	216	26	32	226	320	132
	26	0,74	207	170	24	32	247	298	123
	27	0,75	257	200	23	35	260	333	136
	28	0,79	239	214	27	40	246	348	139
	29	0,79	204	190	23	41	296	344	139
	30	0,79	226	208	25	40	248	—	—
	31	0,85	200	172	23	38	273	361	144
	32	0,91	180	146	22	36	267	332	131
	33	0,92	129	118	16	29	218	291	116
	34	0,99	152	129	16	33	146	—	—
	35	1,00	146	141	16	27	216	293	118
	36	1,00	122	80	12	24	213	270	108
	37	1,01	146	118	15	24	—	292	115
	38	1,02	122	121	12	24	230	285	115
	39	1,04	114	104	12	23	211	269	104
	40	1,04	145	122	17	25	—	285	115
	41	1,06	124	100	11	21	179	260	100
	42	1,06	94	78	12	17	149	230	89
	43	1,06	138	113	16	23	192	273	110
	44	1,10	90	78	8	21	157	236	94
Coeficiente de variación medio (%)			3,8	3,2	6,7	8,1	5,6	1,7	2,4

da en las normas oficiales chilenas. En las experiencias se obtuvo además la resistencia cilíndrica, resultado que también aparece en la Tabla II. La resistencia a compresión cilíndrica sólo la usamos en la comparación con resultados extranjeros. En ambas regresiones la función elegida para el ajuste fue del tipo $R_1 = aR_2^k$, donde a y k son parámetros que se determinaron en cada caso.

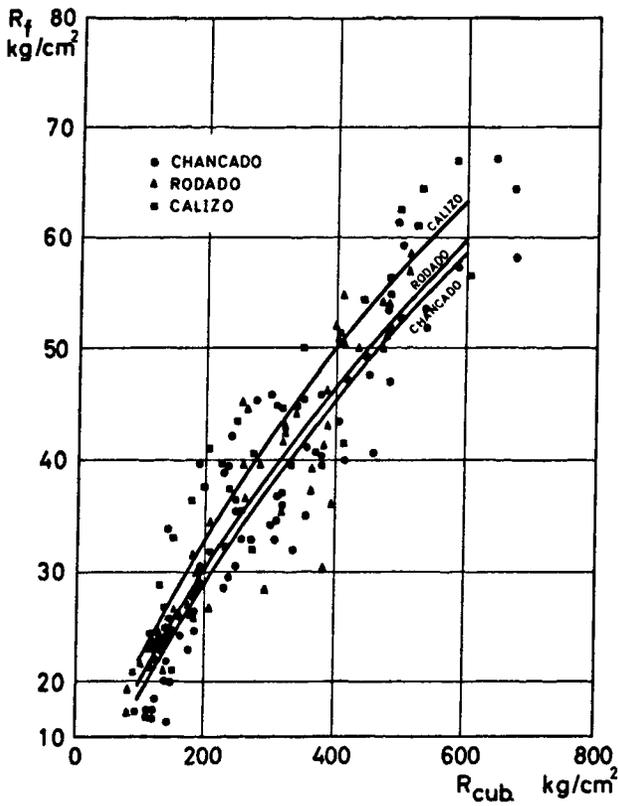


Fig. 8. Relación entre resistencia de flexotracción y resistencia a compresión cúbica. Las curvas son significativamente diferentes.

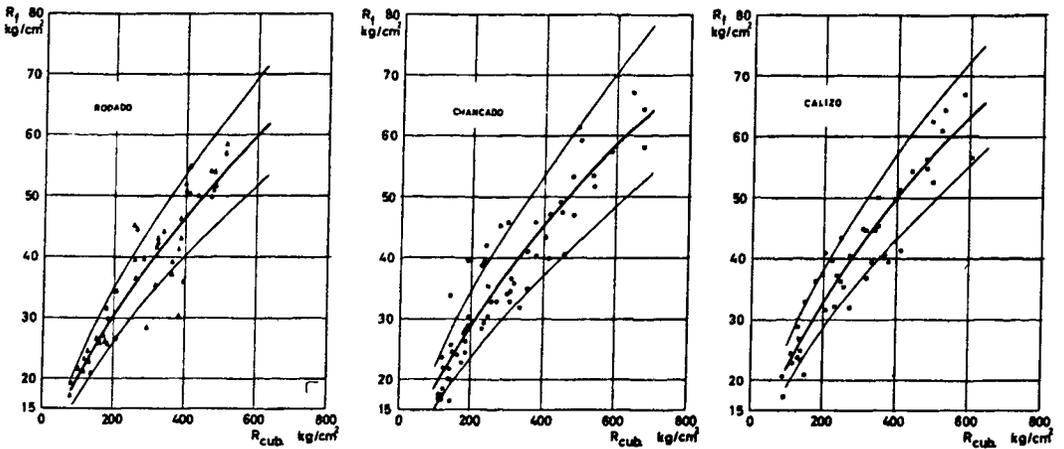


Fig. 9. Relación entre resistencia de flexotracción y resistencia a compresión cúbica, según el tipo de grava, y límites de confianza 90%.

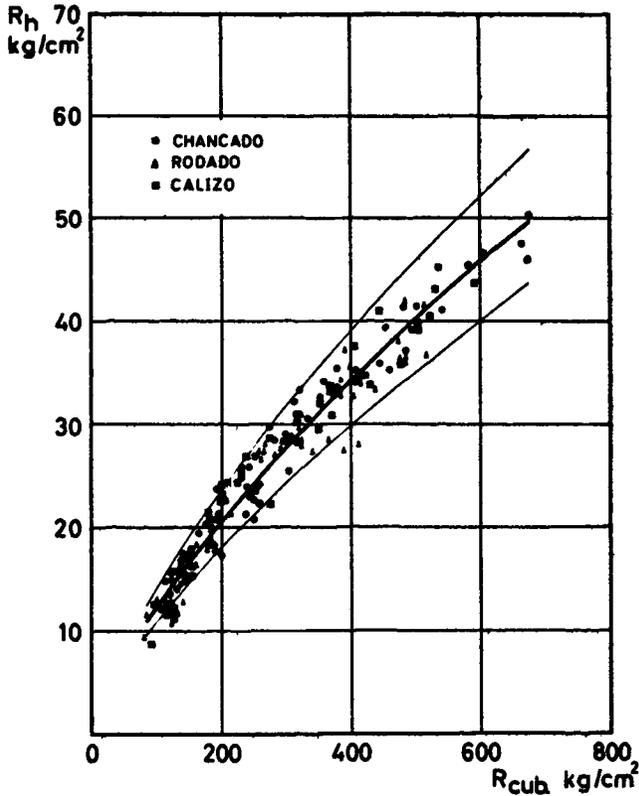


Fig. 10. Resistencia de hendimiento en función de la resistencia a compresión cúbica. La relación es común para hormigones fabricados con las diferentes gravas.

Conviene acotar que el coeficiente de variación medio de la resistencia cúbica resultó 3,8% y el respectivo de la cilíndrica 3,2%.

Por creerlo de interés citamos a continuación las expresiones obtenidas para las resistencias de hendimiento y de flexotracción en función de la de compresión cúbica:

$$R_b = 0,45 R_{cub}^{0,724}$$

$$R_f = 1,08 R_{cub}^{0,649} \text{ (chancado)}$$

$$R_f = 1,11 R_{cub}^{0,623} \text{ (rodado)}$$

$$R_f = 1,42 R_{cub}^{0,594} \text{ (calizo)}$$

Para correlacionar la resistencia de flexotracción con la de hendimiento se empleó una expresión lineal; $R_f = N R_b + Q$. La influencia del tipo de árido afectó también esta regresión y determinó el empleo de dos expresiones diferentes (Figs. 11 y 12).

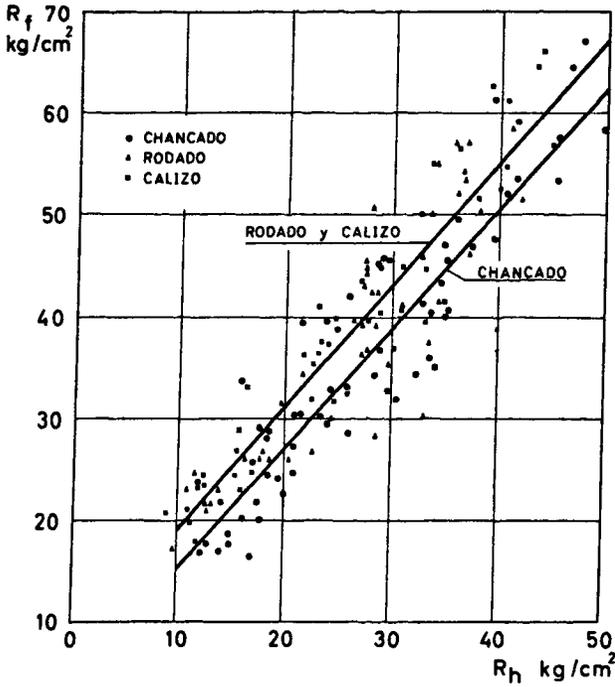


Fig. 11. Relación entre resistencia de flexotracción y resistencia de hendimiento. Las curvas difieren significativamente.

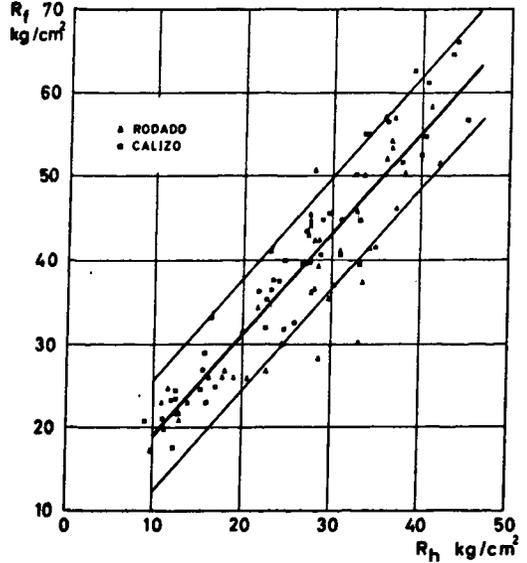
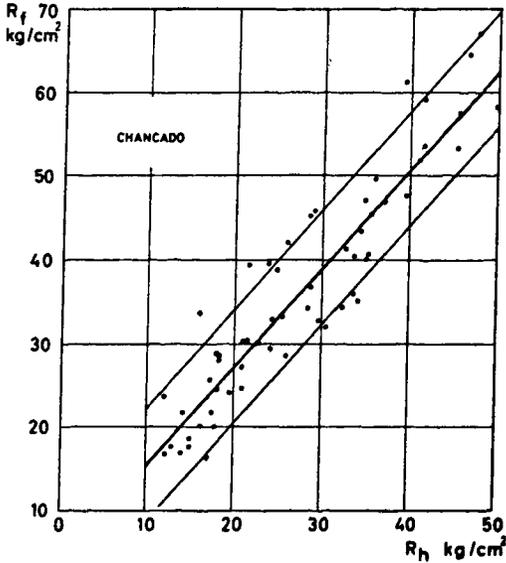


Fig. 12. Relación entre resistencia de flexotracción y resistencia de hendimiento, según el tipo de grava, y límites de confianza 90%.

árido silíceo chancado: $R_f = 1,19 R_b + 3,1$

árido silíceo rodado y

calizo chancado : $R_f = 1,21 R_b + 6,8$

Conviene agregar que la función potencial, empleada anteriormente para

relacionar resistencias, no pudo ajustarse en este caso.

La resistencia de hendimiento está correlacionada bastante satisfactoriamente con los módulos de elasticidad estático y dinámico, y de rigidez dinámico (Fig. 13).

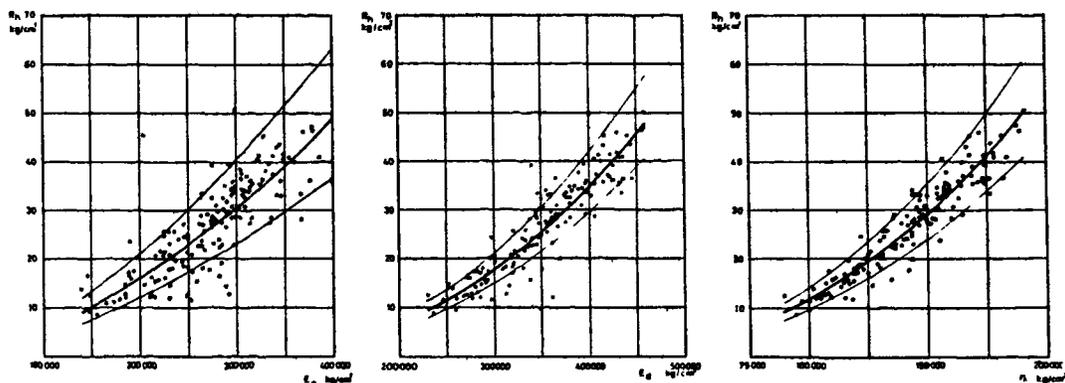


Fig. 13. Resistencia de hendimiento en función de los módulos de Young estático y dinámico, y del módulo de rigidez.

En el caso del módulo estático de Young, la regresión presenta una mayor dispersión, debido probablemente a los errores propios de este ensayo que, como se sabe, son mayores que en el ensayo dinámico¹⁷.

En el caso particular de la regresión que comentamos, en esa dispersión mayor influye además el provenir 61 de los 145 datos considerados, del resultado de un solo ensayo.

Nos ha parecido que el panorama de interdependencia de las diferentes resistencias queda mucho más completo si incluimos las relaciones entre la resistencia a compresión y los módulos de elasticidad considerados. Estas relaciones están indicadas en la Fig. 14. Valen en este caso gran parte de las observaciones ya hechas respecto de las relaciones entre la resistencia de hendimiento y los diferentes módulos.

DISCUSION

A través de algunos de los resultados que se han expuesto puede observarse que el ensayo de flexotracción posee una sensibilidad mucho mayor que el de hendimiento a la influencia del tipo de grava. (Figs. 6, 8 y 11).

Es nuestra impresión que el ensayo de flexotracción representa mejor la resistencia a la tracción del hormigón. Recuérdese que en ese ensayo la rotura de la probeta se inicia en fibras de su cara inferior donde dominan las tensio-

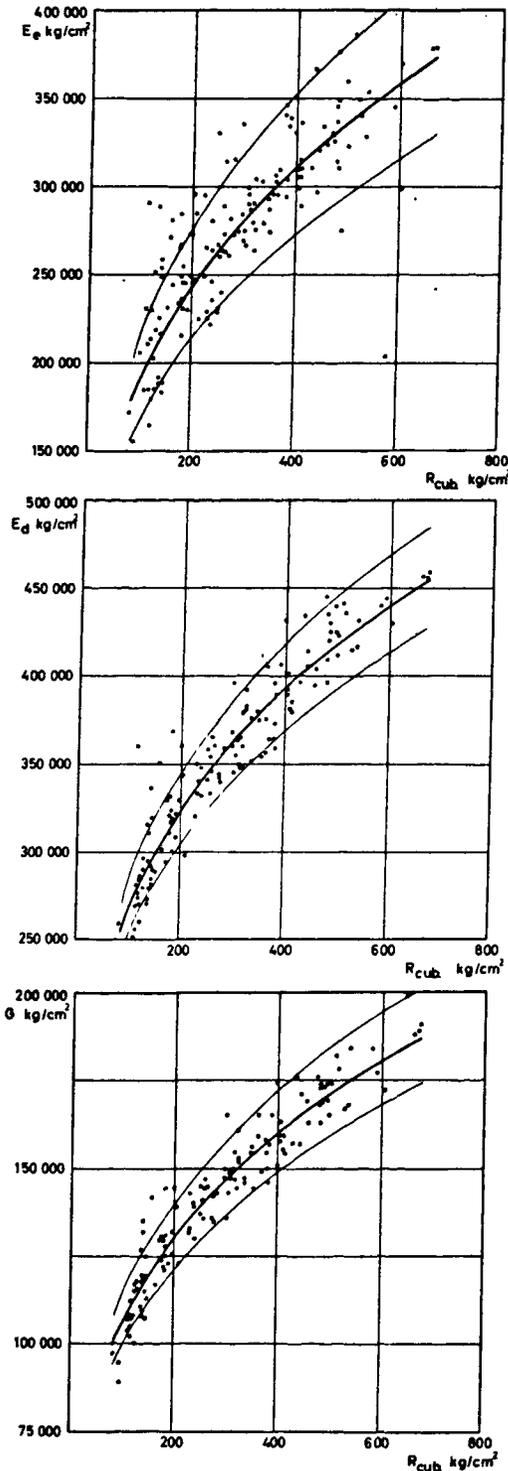


Fig. 14. Módulo de Young estático y dinámico, y módulo de rigidez en función de la resistencia cúbica.

nes de tracción¹⁸; en el ensayo de hendimiento, en cambio, la rotura se inicia en un punto cercano al centro del cilindro, donde el material se halla confinado y sometido tanto a tensiones de tracción como de compresión¹⁹. Estas características del ensayo de flexotracción hacen que sus resultados no presenten correlaciones tan buenas con la razón agua-cemento y con la resistencia de compresión como los del ensayo de hendimiento. Lo dicho debe considerarse como una tesis probable; para obtener una información más concluyente sería necesario programar un conjunto de experiencias donde además de determinarse las resistencias de hendimiento, de flexotracción y de tracción directa, se estudien otros parámetros.

De los resultados comentados, tal vez el de mayor trascendencia es el indicado en las Figs. 11 y 12; en ellos se observa claramente que la relación entre flexotracción y hendimiento queda influida por la calidad o forma de la grava empleada. Esto constituye, a no dudarlo, un serio inconveniente del ensayo de hendimiento como sustituto del de flexotracción.

En la comparación con datos extranjeros se seleccionó la información disponible excluyendo toda aquella obtenida en condiciones de ensayo diferentes. En particular se excluyeron todas aquellas investigaciones en las cuales, en el ensayo de flexotracción, la sollicitación se efectuó por medio de una carga central, ya que en ese caso la tensión de rotura obtenida es del orden de 20 a 25% mayor²⁰. Las

comparaciones con nuestros datos están esquematizadas en las Figs. 15, 16 y 17. Los datos de Gonnerman y Shuman², y de Walker y Bloem²¹ se incluyen principalmente por su importancia, si bien las dimensiones de las viguetas empleadas por ellos son un poco diferentes. En la Tabla III indicamos las dimensiones de las probetas empleadas por investigadores con cuyos resultados compararemos los nuestros.

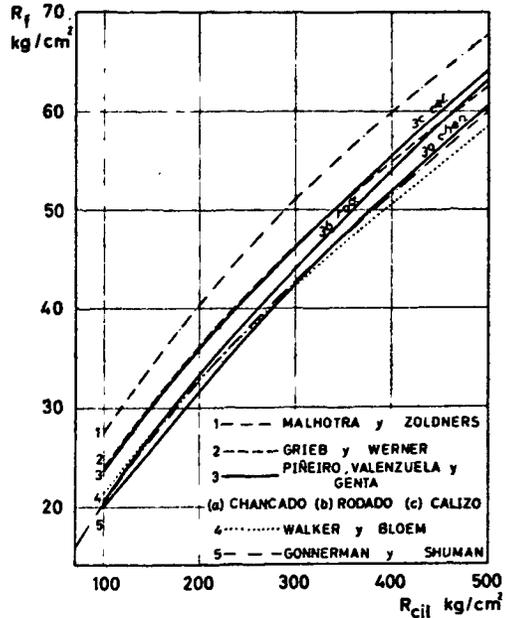
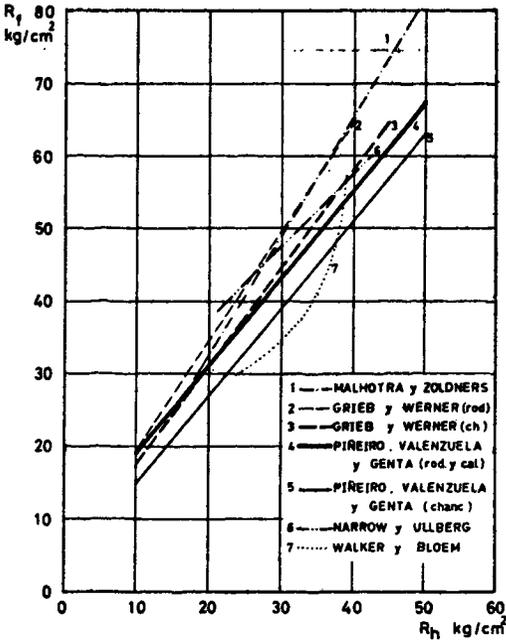


TABLA III

DIMENSIONES DE PROBETAS EMPLEADAS POR DIFERENTES INVESTIGADORES

	Prob. cilíndrica cm	Prob. hendidamiento cm	Prob. flexotracción* cm
Gonnerman y Shuman ²	d= 15 h= 30		18 x 25 x 96
Grieb y Werner ²²	d= 15 h= 30	d= 15 h= 30	15 x 15 x 52
Malhotra y Zoldners ²³	d= 15 h= 30	d= 15 h= 30	9 x 10 x 41
Narrow y Ullberg ²⁴	—————	d= 15 h= 30	15 x 15 x 53
Piñeiro, Valenzuela y Genta	d= 15 h= 30	d= 15 h= 30	15 x 15 x 60 (53)
Walker y Bloem ²¹	d= 15 h= 30	d= 15 h= 30	15 x 15 x 91

* Ensayos hechos con dos cargas en los tercios de la luz.

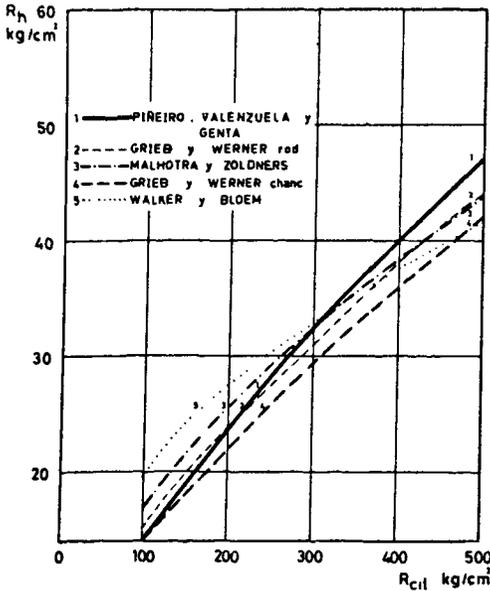


Fig. 17. Resistencia de hendimiento función de la resistencia cilíndrica. Comparación con datos extranjeros.

depende del tipo de árido, pero sí dependen de ese factor las relaciones entre

De las investigaciones citadas, la de mayor analogía con la nuestra es la de Grieb y Werner²². Parte del programa de dicha investigación comprendió la determinación de las resistencias de hendimiento, flexotracción y compresión en hormigones fabricados con dos gravas diferentes, una caliza chancada y otra silíceá rodada. En este caso, las dispersiones resultantes al correlacionar los datos de los diferentes ensayos presentan una gran similitud con las dispersiones de nuestros resultados.

Por otro lado, analizando los datos de dicho trabajo se puede observar que de acuerdo a ellos la relación entre flexotracción con compresión no

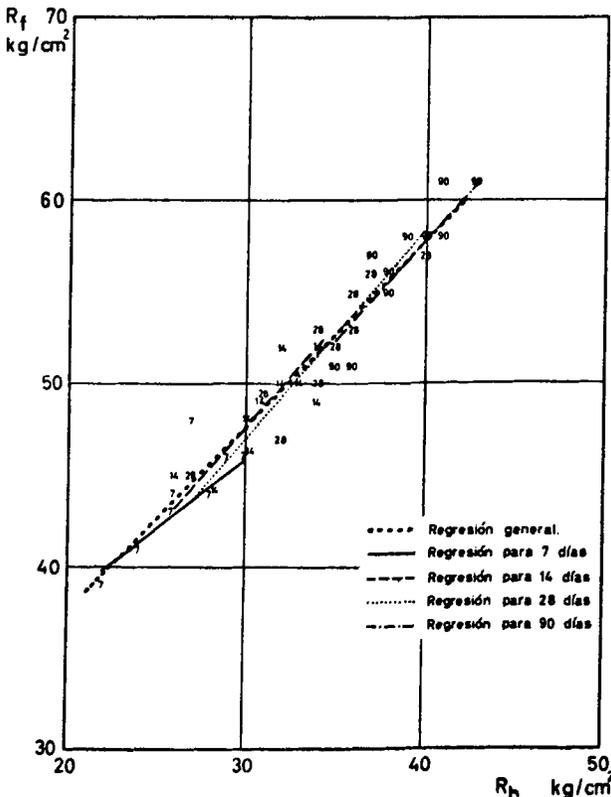


Fig. 18. Análisis de los datos de Ullberg y Narrow para estudiar el efecto de la edad de ensayo en la relación entre resistencia de hendimiento y de flexotracción. A través de lo indicado en esta figura puede inferirse que la edad de ensayo prácticamente no influye en tal relación.

lidad del Ministerio de Obras Públicas.

Los autores agradecen las valiosas indicaciones de don Ernesto Gómez y de don Atilano Lamana. Expresan su agradecimiento por las facilidades dadas, que ayudaron a la realización de este trabajo, a don Jorge Rojas ex Ingeniero Jefe del Laboratorio de Vialidad, a don Manuel Rodríguez, actual Ingeniero Jefe de ese Laboratorio, y a don Harry Williams del IDIEM. Agradecen también el apoyo de la fábrica de cemento Cerro Blanco de Polpaico, que facilitó parte de materiales y equipo.

REFERENCIAS

1. PROBST, E. "Vorlesungen über Eisenbeton". Ed. J. Springer, Berlín, 1923, Tomo I, p. 32.
2. GONNERMAN, H. F.; SHUMAN, E. C. "Compression, flexure and tension tests of plain concrete". Proceedings of the American Society for Testing Materials, Vol. 28, 1928, pp. 527 - 564.
3. RILEM "Direct tensile test of concrete" (inquiry), Bull. RILEM, nº 20, septiembre 1963, pp. 83 - 90.
4. VENUAT, M.; PAPADAKIS, M. "Contrôle et essais des ciments, mortiers et bétons". Ed. Eyrolles, París 1961, pp. 262 - 264.
5. INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA "Indirect tensile test of concrete". Documentation. Nota interna RILEM, Buenos Aires, marzo 1967.
6. CARNEIRO, F. L. L. B.; BARCELLOS, A. "Tensile strength of concrete". Bull. Rilem, nº 13, marzo 1953, pp. 99 - 123.
7. AKAZAWA, T. "Méthode pour l'essai de traction des bétons". Bull. Rilem, nº 16, noviembre 1953, pp. 13 - 23.
8. ASTM C 496 - 64 T. "Splitting tensile strength of molded concrete cylinders".
9. COMISION ENSAYOS DE CEMENTO Y HORMIGONES DE LA RILEM "Método RILEM de muestreo, confección, conservación y ensayos mecánicos del hormigón". Revista del IDIEM, vol 5, nº 2, (octubre 1966), pp. 93 - 100.
10. ASTM C 33 - 64 "Standard specifications for concrete aggregates".
11. INDITECNOR 5 - 3 ch "Selección de muestras al azar".
12. DIN 1048 "Bestimmungen für Betonprüfungen bei Ausführung von Bauwerken aus Beton und Stahlbeton".
13. ASTM C 39 - 59 "Standard method of test for compressive strength of molded concrete cylinders".
14. ASTM C 78 - 57 "Flexural strength of concrete (using simple beam with third point loading)".
15. ASTM C 215 - 60 "Fundamental transverse, longitudinal, and torsional frequencies of concrete specimens".
16. ASTM C 469 - 65 "Standard method of test for static Young's modulus of elasticity and Poisson's ratio in compression of cylindrical concrete specimens".
17. JONES, R. "Non destructive testing of concrete" Cambridge University Press, 1962, p. 23.
18. SALIGER, R. "El hormigón armado" Trad. de la 7ª ed. alemana. Ed. Labor, 1957, pp. 85 - 86.
19. PELTIER, R. "Theoretical investigation of the brasilian test". Bulletin RILEM, nº 19, (noviembre 1956), pp. 31 - 69.

flexotracción con hendimiento, y hendimiento con compresión. De estas tres conclusiones, la primera y la última se contraponen a nuestros resultados. Conviene destacar además que, si de acuerdo a estos datos no se advierte que la relación entre flexotracción y compresión dependa del tipo de árido, esto se debe en gran parte al número de datos analizados ya que tal dependencia es bien conocida.

Una duda que a menudo se presenta al emplear relaciones entre resistencias es si estas relaciones quedan influidas por la edad del hormigón. Ya que el conocimiento de este punto da mucho mayor generalidad a los resultados, nos ha parecido de interés hacer el análisis de los datos de Narrow y Ullberg²⁴, que ensayaron hormigones hasta de 90 días de edad. La línea de regresión general, las regresiones parciales (para 7, 14, 28 y 90 días) y los puntos respectivos se han dibujado en la Fig. 18.

Aunque los datos no permitieron hacer un análisis estadístico acabado, se puede observar que las líneas de regresión no se separan significativamente de la línea general. En consecuencia y hablando en términos muy generales, por lo menos para la relación entre flexotracción y hendimiento, la edad, hasta 90 días, no afecta las relaciones obtenidas.

CONCLUSIONES

1. La relación entre la resistencia de flexotracción y la de hendimiento depende del tipo de árido empleado. Esto constituye un serio inconveniente a la idea de sustituir el ensayo de flexotracción por el de hendimiento.
2. Las resistencias de hendimiento y de flexotracción están correlacionadas con la razón agua-cemento y con la resistencia a compresión. En el caso de la flexotracción las correlaciones resultaron diferentes según el tipo de árido.
3. Para las relaciones entre resistencias se obtuvo un ajuste suficientemente aceptable empleando una función del tipo $R_1 = a R_2^k$, con excepción de la relación entre resistencia de hendimiento y la de flexotracción en que el ajuste se obtuvo con una expresión lineal.
4. Existen correlaciones entre la resistencia de hendimiento y los diferentes módulos de elasticidad.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación contó con el respaldo económico de la Dirección de Via-

20. WRIGHT, P. J. F. "The effect of the method of test on the flexural strength of concrete". Magazine of Concrete Research, vol 4, n° 11, (octubre 1952), pp. 67 - 76.
21. WALKER, S.; BLOEM, D. L. "Effects of aggregate size on properties of concrete". Journal of the American Concrete Institute, Proc. vol. 57, n° 3, (septiembre 1960), pp. 283 - 298.
22. GRIEB, W. E.; WERNER, G. "Comparison of the splitting tensile strength of concrete with flexural and compressive strengths". Public Roads, vol. 32, n° 5, (diciembre 1962).
23. MALHOTRA, V. M.; ZOLDNERS, N. G. "Comparison of ring-tensile strength of concrete with compressive, flexural and splitting-tensile strengths". Journal of Materials, vol. 2, n° 1, (marzo 1967), pp. 160 - 199.
24. NARROW, I.; ULLBERG, E. "Correlation between tensile splitting strength and flexural strength of concrete". Journal of the American Concrete Institute, Proc. vol. 60, n° 2, (febrero 1963), pp. 27 - 38.

FLEXURE AND SPLITTING TESTS OF CONCRETE

SUMMARY:

An investigation was conducted as an attempt to derive the tensile strength of concrete from splitting tests. To this purpose concrete specimens were made whose strengths covered a wide range using three types of aggregate and they were tested in compression, flexure, splitting, and besides their statical and dynamical Young moduli and dynamical rigidity modulus were measured.

Correlations are presented between the above mentioned characteristics and flexural strength on one hand and splitting strength on the other. It is shown that flexural strength depends on type of aggregate in a greater measure than splitting does, consequently the correlation between both of them is significantly dependent on aggregate type.

Results are analysed and comparisons are made with those obtained by other investigators.