

## RESISTENCIAS MECANICAS DEL HORMIGON. ESTUDIOS SOBRE SU RESISTENCIA A TRACCION DIRECTA

Moisés PIÑEIRO\*

Victor GORODISCHER\*\*

Gustavo CANTIZANO\*\*

Alfredo VERGARA\*\*

Rene VASQUEZ\*\*

### RESUMEN

*Se informa sobre los resultados más sobresalientes obtenidos en dos investigaciones realizadas en el IDIEM sobre resistencia a tracción directa.*

*Se analiza la influencia del tipo de cemento, del estado de superficie del árido, de la dosis de cemento y del estado de humedad en el momento del ensayo en la relación entre resistencia a tracción y a compresión. Los resultados se comparan con los de otros investigadores. Se muestra que la resistencia a la tracción directa varía entre 1/10 y 1/15 de la resistencia a la compresión. También se destaca la gran influencia que tiene el estado de humedad en el ensayo en la resistencia a la tracción directa.*

### INTRODUCCION

En comparación con otras propiedades del hormigón es poco lo que se sabe de su comportamiento cuando está sometido a tracción. Este vacío relativo a sus características bajo tracción se ha mantenido debido probablemente a que los

---

\* Ingeniero Civil. Profesor de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Jefe de la Sección Investigación de Hormigones del IDIEM, hasta la fecha de su fallecimiento en febrero de 1973.

\*\* Ingeniero Civil.

parámetros más determinantes en el diseño de estructuras se han ligado al comportamiento bajo compresión que es más sencillo de estudiar. No obstante, tanto el desarrollo de nuevos materiales, como la búsqueda permanente de hormigones de características superiores a los que ahora se utilizan hacen aconsejable el conocer más a fondo el comportamiento del hormigón cuando se le solicita a tracción directa.

Tempranamente en el desarrollo de la tecnología del hormigón, MÖRSCH<sup>1</sup> se preocupó de estudiar algunos aspectos importantes del comportamiento del hormigón a tracción. Luego cabe destacar el importante trabajo de GONNERMAN y SHUMAN<sup>2</sup>, publicado en 1928. Posteriormente se advierte una polarización del interés de los investigadores hacia otras interrogantes de la tecnología del hormigón, actitud que se mantuvo hasta trabajos muy recientes<sup>3-6</sup>.

Este artículo se basa principalmente en dos investigaciones realizadas en el IDIEM entre 1966 y 1969<sup>7-8</sup>. La motivación de esta línea de investigación estuvo en la cantidad de problemas que se han planteado al IDIEM con relación al control de los hormigones destinados a calzadas y pavimentos en general. Aunque este control conviene hacerlo basándose en ensayos de flexotracción de viguetas, en Chile se utiliza muy extensivamente, por razones de economía y comodidad, el ensayo de compresión. Los estudios iniciales que se hicieron en el IDIEM se refirieron principalmente a estas dos determinaciones, compresión y flexotracción. Sin embargo, el análisis del problema inicial nos llevó, por extensión, a estudiar el comportamiento del hormigón ante sollicitaciones de tracción directa.

Creemos que lo averiguado en estas investigaciones arroja algo más de luz sobre el fenómeno de rotura del hormigón.

## PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO

Los principales parámetros y variables considerados en conjunto en estas dos investigaciones pueden verse en la Tabla I. La información se obtuvo fabricando coladas de hormigón de las cuales se obtenían probetas compañeras destinadas a las diferentes determinaciones. El orden de fabricación de tales coladas se obtuvo de tablas de números al azar para aminorar así la influencia de factores ajenos a los elegidos.

En el caso de ambas investigaciones conviene destacar, por la importancia que ello tiene, lo relativo al estado de humedad de las probetas durante la conservación y el ensayo. En los casos de las probetas que en la Tabla I se anotan como ensayadas secas, éstas fueron mantenidas los 26 primeros días en cámara húmeda, a esta edad fueron trasladadas por 24 horas al ambiente del laboratorio. A continuación les fue aplicada la resina a las probetas de tracción y colocadas las placas de acero respectivas, para prepararlas como se ve en la Fig. 1. Luego, con el objeto de acelerar el endurecimiento del adhesivo, fueron mantenidas, todas las

probetas, durante 12 horas en un horno a 40°C. Todas las probetas fueron ensayadas secas.

TABLA I  
VARIABLES Y PARAMETROS CONSIDERADOS EN LAS EXPERIENCIAS\*

Variables dependientes	Parámetro o variable	Condición de humedad en el ensayo	Ambito o valores particulares de los parámetros	Referencia
Variables dependientes	Resistencia a la tracción directa	seca	12 a 22 kgf/cm <sup>2</sup>	7
	Resistencia a la tracción directa	saturada	10 a 29 kgf/cm <sup>2</sup>	8
	Módulo elasticidad tracción	seca	162000 a 300000 kgf/cm <sup>2</sup>	7
	Módulo elasticidad compresión	seca	186000 a 420000 kgf/cm <sup>2</sup>	7
Variables independientes	Resistencia a la compresión cilíndrica	seca	100 a 400 kgf/cm <sup>2</sup>	7
	Resistencia a la compresión cilíndrica	saturada	100 a 380 kgf/cm <sup>2</sup>	8
	Tipo de cemento	seca	portland, portland puzolánico	7
	Dosis	saturada	170, 270, 320, 425 kgf/cm <sup>2</sup>	8
	Tipo de árido	saturada	silíceo rodado. silíceo chancado	8

\* En las experiencias originales se consideró también la razón agua-cemento. Con el fin de simplificar el análisis y la exposición, tal parámetro no se incluyó en este informe.

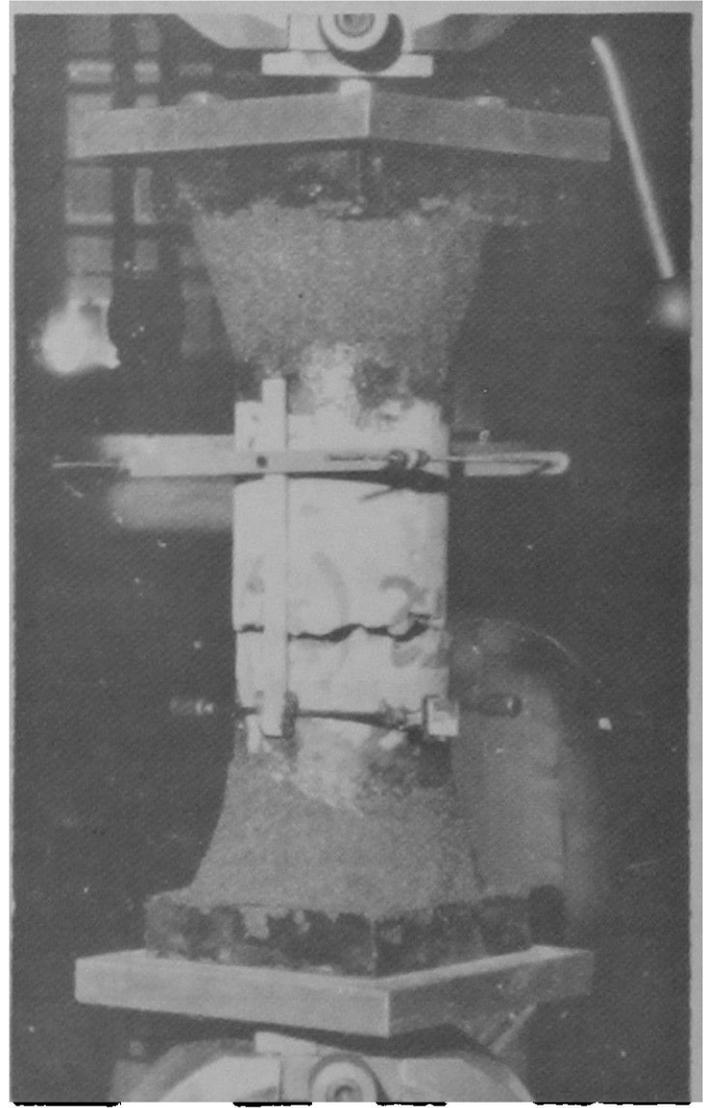


Fig. 1. Vista de las probetas empleadas para determinar: a) la resistencia a la tracción directa (cilindro de 15 x 30 cm); b) el módulo de Young a la tracción (cilindro de 10 x 30 cm). Se observa el bisel de mortero epóxico. En la foto b) puede observarse aún colocados los dispositivos del elasticímetro de Martens para medir deformaciones.

En los casos que en la Tabla I se señalan como saturadas, las probetas fueron mantenidas en cámara húmeda hasta 28 días, sólo se extrajeron temporalmente de la cámara tres días antes del ensayo para el pegado de las placas de acero, y se restituyeron inmediatamente al ambiente húmedo. El ensayo se hizo en ese mismo estado.

En cuanto a materiales se eligió como árido uno muy utilizado, de naturaleza silíceo, proveniente de la zona de Santiago. Este árido se utilizó tanto chancado como rodado. Con respecto a los cementos se trató que los elegidos fueran representativos en Chile y que además permitieran comparación con cementos extranjeros. Las características principales de estos materiales se describen en las Tablas II y III.

Las características principales de las probetas y de las determinaciones hechas con ellas pueden verse en la Tabla IV.

TABLA II  
PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES

Tipo	ARENA			GRAVA			CEMENTO		
	Módulo finura	Densidad aparente kg/dm <sup>3</sup>	Peso específico	Tamaño máximo cm	Densidad aparente kg/dm <sup>3</sup>	Peso específico	Nombre	Tipo	Finura Blaine cm <sup>2</sup> /g
REFERENCIA 7									
chancado	2.4	1.8	2.7	2.5	1.7	2.7	Super Melón	Portland	3200
chancado	2.4	1.8	2.7	2.5	1.7	2.7	Polpaico 400	Portland puzolánico	4800
REFERENCIA 8									
rodado	2.4	1.7	2.7	3.8	1.8	2.7	Super Melón	Portland	3200
chancado	2.5	1.6	2.7	3.8	1.7	2.7	Super Melón	Portland	3200

TABLA III  
PRINCIPALES CARACTERISTICAS QUIMICAS DE LOS CEMENTOS

Nombre	Super Melón	Polpaico 400
Tipo	Portland	Portland puzolánico
Composición %	C <sub>2</sub> S 16	Clínquer 80% C <sub>2</sub> S 10
	C <sub>3</sub> S 53	C <sub>3</sub> S 73
	C <sub>3</sub> A 13	C <sub>3</sub> A 2
	C <sub>4</sub> AF 9	C <sub>4</sub> AF 14
		Puzolana 20 %

TABLA IV

CARACTERISTICAS DE LAS PROBETAS UTILIZADAS Y DE LAS DETERMINACIONES HECHAS

Referencia	Determinación <sup>1</sup>	Dimensiones probetas cilíndricas <sup>2</sup> cm		Tipo máquina de ensayo <sup>3</sup>	Nº probetas	Expresión cálculo <sup>4</sup>
		d	h			
7	$R_c$	15	30	Lossenhausenwerk (300)	2	$R_c = 4 P / \pi d^2$
	$R_t$	15	30	Amsler (15)	4	$R_t = 4 P / \pi d^2$
	$E_c$	15	30	Lossenhausenwerk (300)	2	$E_c = S_2 - S_1 / (\epsilon - 0.00005)$
	$E_t$	10	30	Amsler (15)	3	$E_t = S_2 / \epsilon$
8	$R_c$	15	30	Lossenhausenwerk (300)	3	$R_c = 4 P / \pi d^2$
	$R_t$	15	30	Amsler (15)	3	$R_t = 4 P / \pi d^2$

1.  $R_c$  = tensión de rotura en compresión;  $R_t$  = tensión de rotura en tracción;  $E_c$  = módulo de Young en compresión;  $E_t$  = módulo de Young en tracción. 2.  $d$  = diámetro;  $h$  = altura. 3. El número entre paréntesis corresponde a la carga máxima de la máquina en toneladas. 4.  $S_1$  = tensión correspondiente a una deformación unitaria de  $50 \mu \text{ cm/cm}$ ;  $S_2$  = tensión correspondiente a un 50% de la carga de rotura;  $\epsilon$  = deformación unitaria correspondiente a la tensión  $S_2$ .

## RESULTADOS

En la Fig. 1 se muestra el tipo de probeta utilizado en los ensayos de tracción. En la Figs. 2 a 6 se han consignado los principales resultados obtenidos. Por razones de orden práctico y para mayor simplicidad en el análisis la variable independiente que se utilizó de preferencia fue la tensión de rotura en compresión determinada en la probeta cilíndrica. En los hormigones de ambas investigaciones se determinó la razón agua-cemento, pero esta información se omitió acá por las razones dadas anteriormente.

En la Fig. 2 se muestra la influencia del tipo de cemento en la relación entre las tensiones de rotura a compresión y a tracción. Pese a que se utilizó un cemento portland y uno portland puzolánico, muy diferentes en cuanto a composición, los resultados no difirieron entre sí\*

En la Fig. 3 se puede apreciar la influencia del estado de superficie del árido en la relación entre las tensiones de rotura en compresión y tracción directa. Se utilizaron acá dos áridos cuya composición mineralógica era similar, pero uno de ellos era de cantos rodados mientras que el otro se había obtenido mediante chancado. Esta diferencia en los estados de superficie del árido no influyó significativamente en los resultados.

En la Fig. 4 se ilustra la influencia de la dosis de cemento en la relación entre las tensiones de rotura en compresión y tracción directa. Este factor tiene una influencia clara que queda en evidencia con el simple examen visual de conjunto de los resultados individuales.

\* El cemento portland es el Super Melón cuya composición lo ubica entre los cementos tipo I y III ASTM. El cemento portland puzolánico es el Polpaico 400, constituido por clínker portland 80% y agregado puzolánico 20%. Dentro del panorama mundial de tipos de cemento, el análisis de su clínker lo ubicaría entre los cementos portland Ferrari (alto contenido de  $C_3S$  y casi ausencia de  $C_3A$ ).

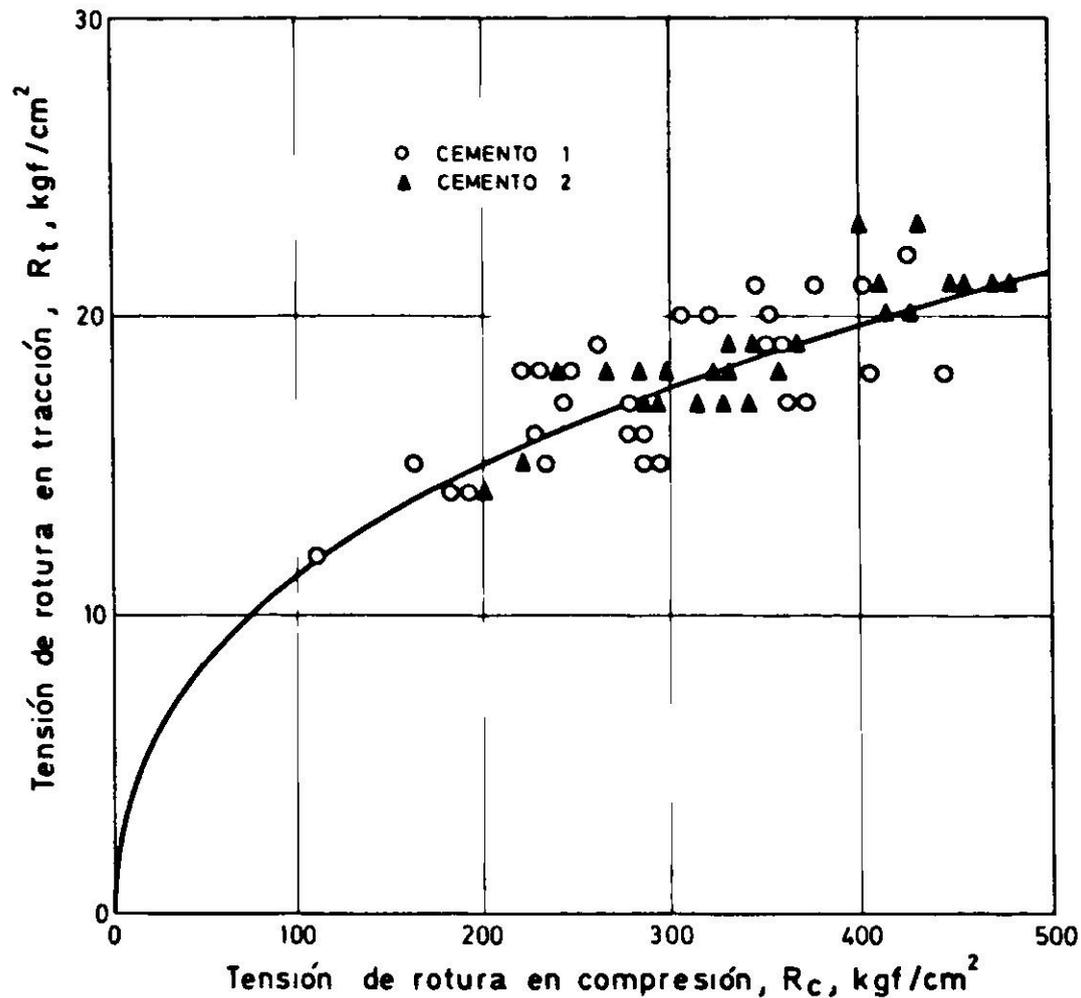


Fig. 2. Relación entre la resistencia a compresión y la de tracción directa para hormigones fabricados con 2 cementos diferentes. Se trata de probetas cilíndricas ensayadas secas a 28 días. Se comprueba que el tipo de cemento no influye en la relación entre resistencias.

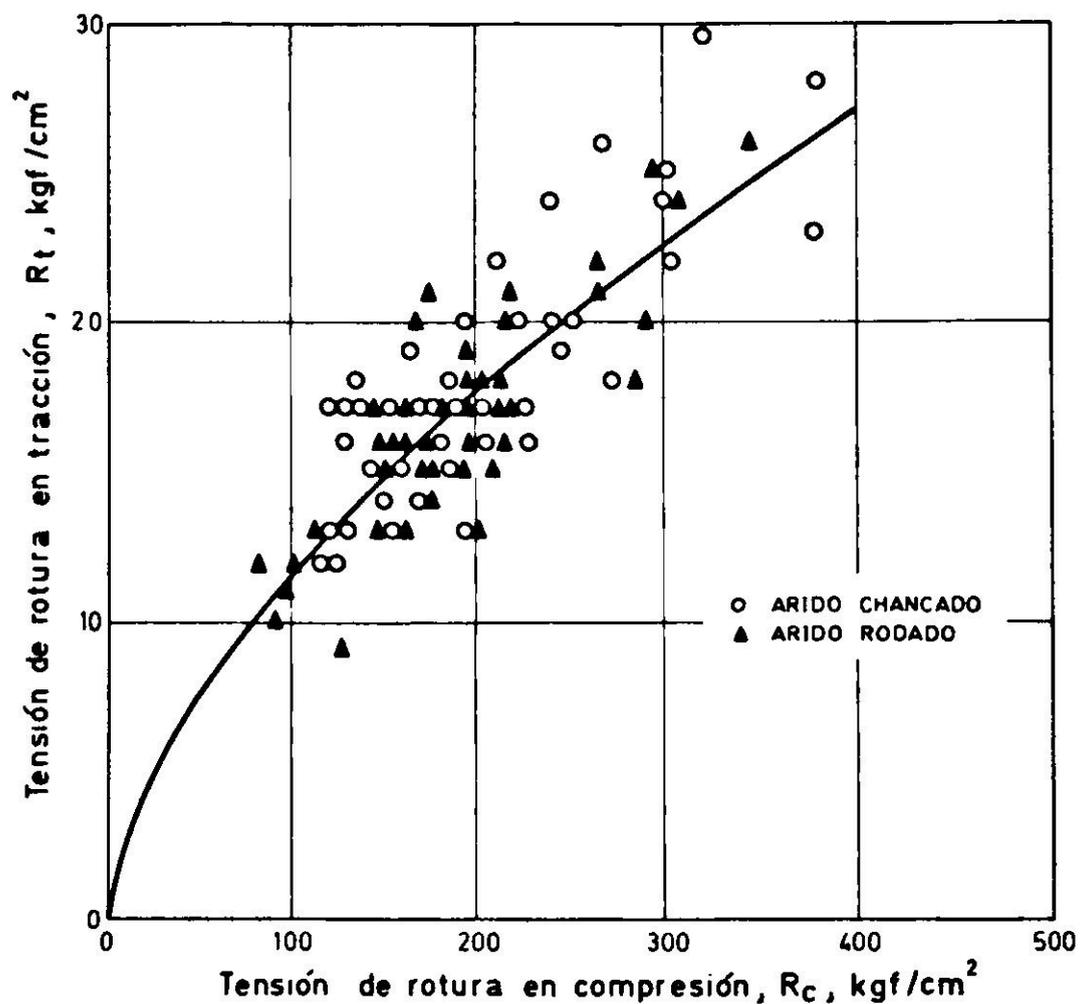


Fig. 3. Relación entre la resistencia a la compresión y la de tracción directa para hormigones fabricados con áridos de la misma constitución pero de forma diferente: uno es de cantos rodados, el otro proviene de chancado. En este caso se trataba de probetas que fueron ensayadas en condición saturada.

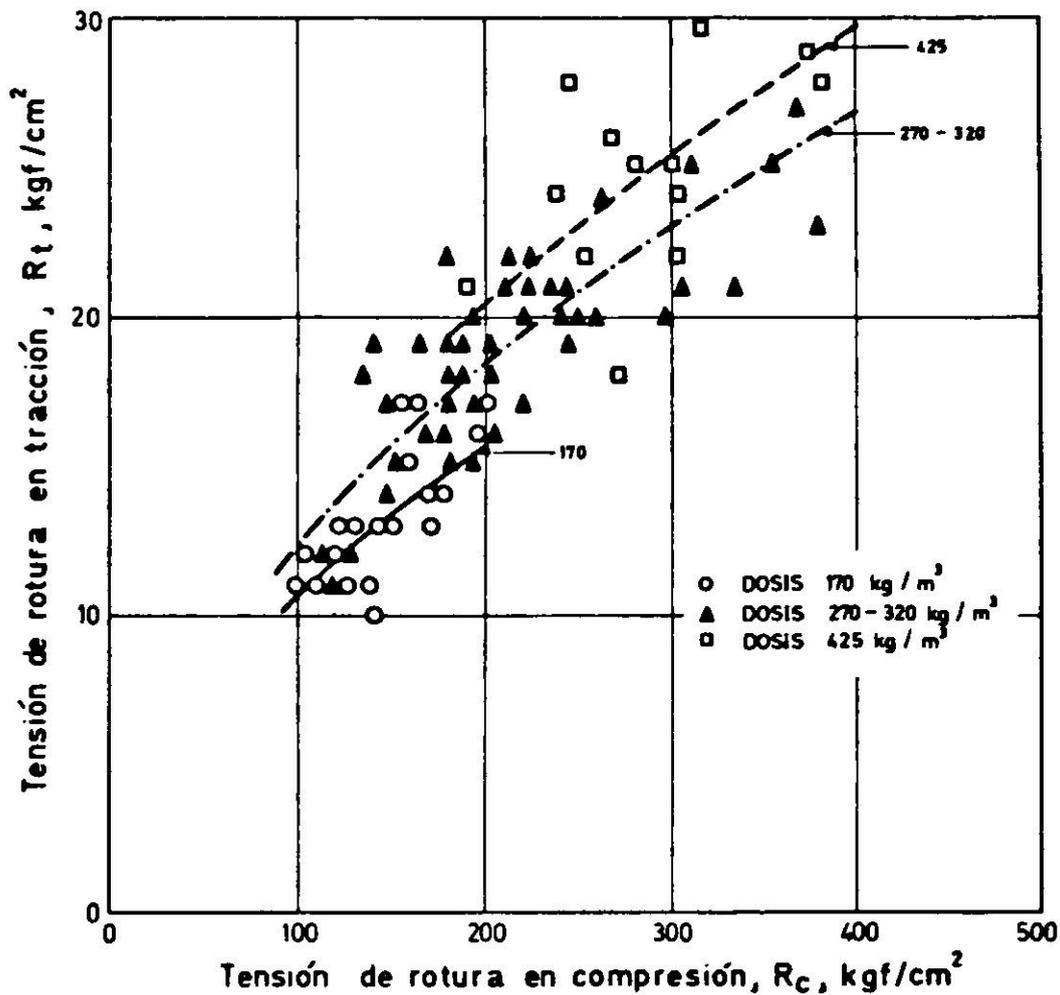


Fig. 4. Influencia de la dosis de cemento en la relación entre la resistencia a compresión y la de tracción. En este caso se mantuvo constante el cemento (Super Melón), el árido (chancado) y el tipo de conservación y ensayo de las probetas (mantenidas en cámara húmeda y ensayadas saturadas).

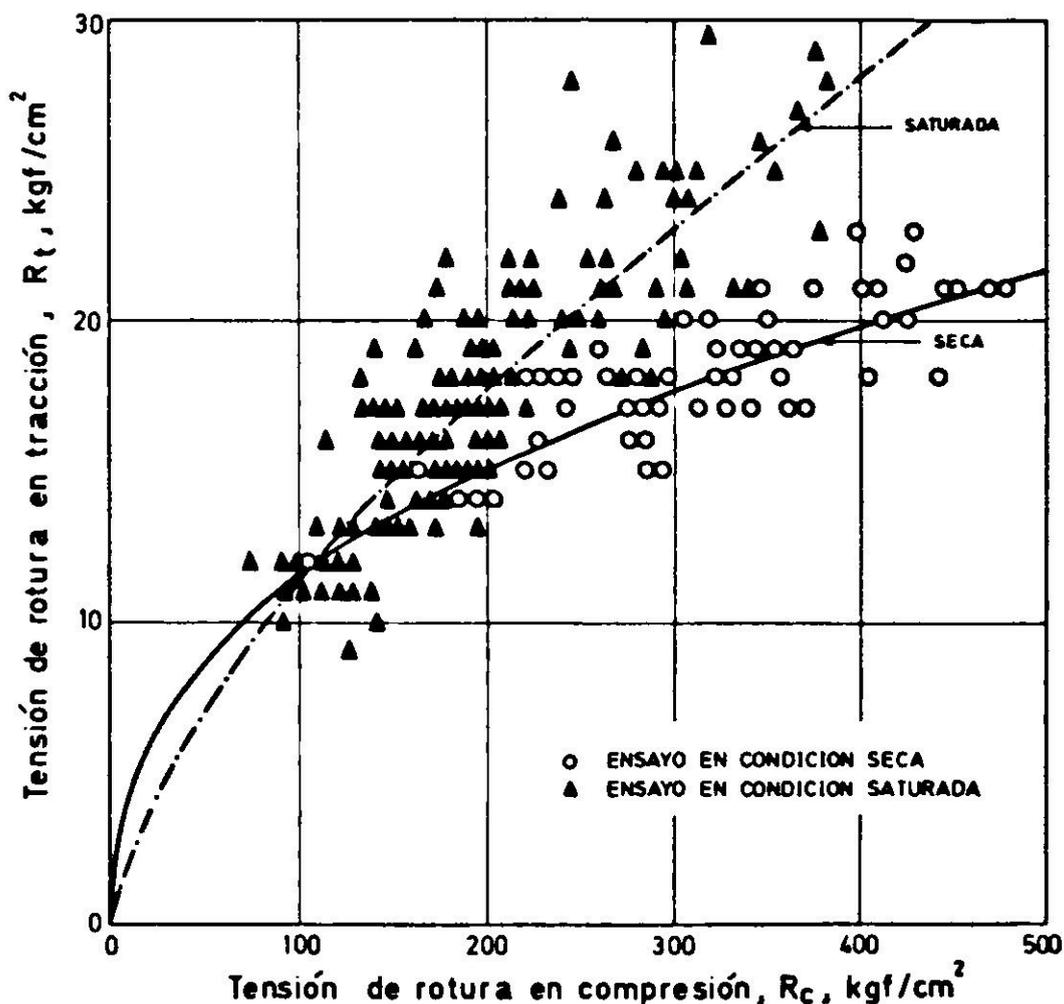


Fig. 5. Influencia de la condición de humedad en el ensayo. Las probetas ensayadas en la condición saturada incluyen los hormigones de la Ref. 8. Los hormigones ensayados secos corresponden a la Ref. 7.

La Fig. 5 muestra la influencia del tipo de conservación de las probetas en la relación entre las resistencias de compresión y tracción. Según se observa en los datos originales la conformación de este gráfico se deriva de la diferente influencia que tienen las condiciones de curado y de ensayo en las resistencias de compresión y de tracción a 28 días, a saber, que la resistencia a la tracción disminuye más por falta de curado húmedo que la resistencia a la compresión.

La Fig. 6 muestra la relación entre los módulos de Young, en compresión y tracción, de las probetas ensayadas secas a 28 días. Se advierte allí que los valores de los módulos de tracción son sistemáticamente menores que los de compresión. No podemos asegurar que este resultado sea general pero sí creemos que corresponde a las condiciones de conservación y ensayo de las probetas.

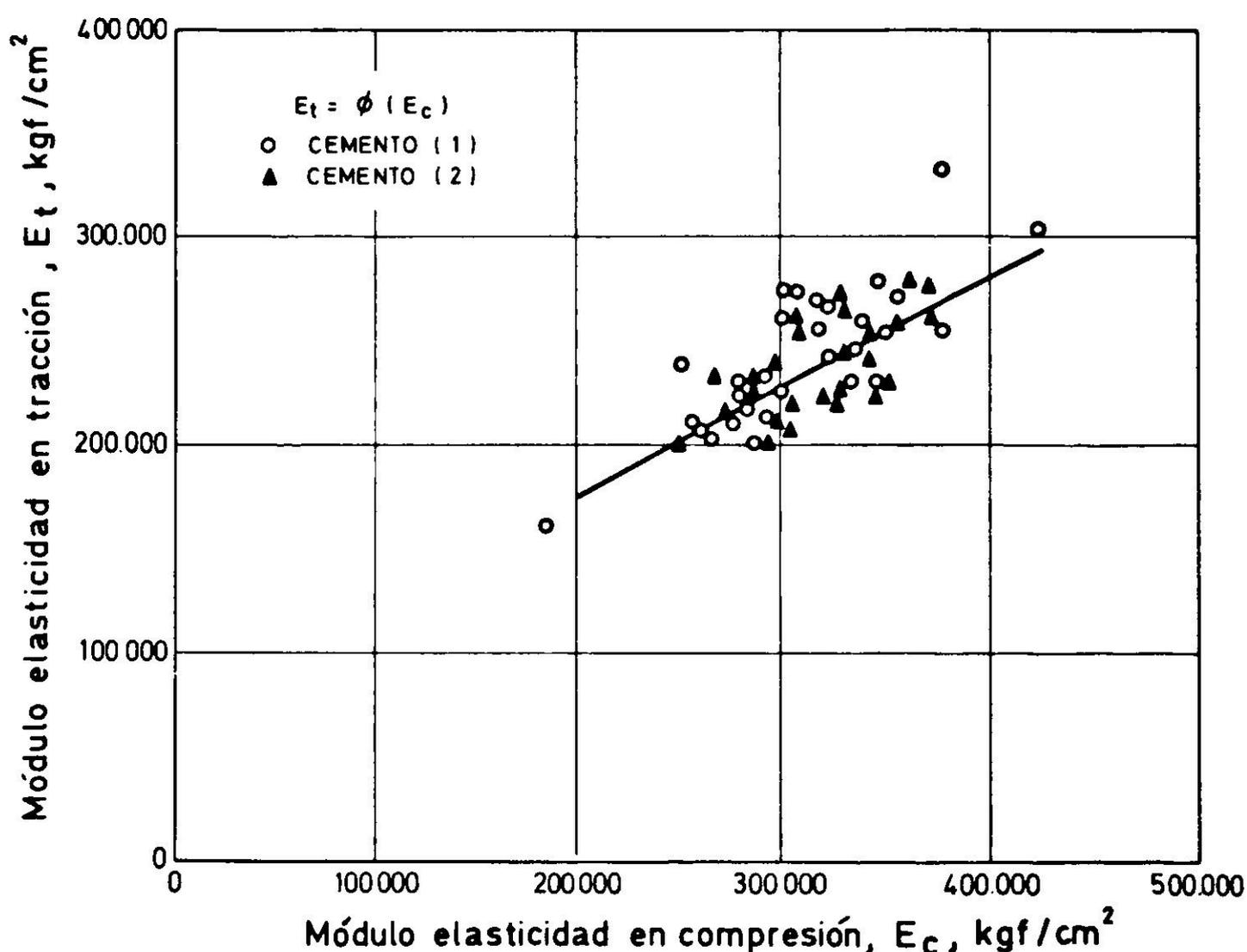


Fig. 6. Relación entre el módulo de elasticidad en tracción y el módulo de elasticidad en compresión, en ambos casos de probetas ensayadas secas. Creemos que el estado de humedad en el ensayo fue el factor determinante en la disminución del valor del módulo de Young en tracción. Esta es una interrogante que merece ser estudiada con mayor profundidad y extensión.

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los cementos empleados son muy similares en lo que se refiere a desarrollo de sus resistencias a compresión. La Fig. 2 muestra que tal similitud puede hacerse extensible a otras propiedades.

Pudiera pensarse que el árido chancado, por sus mejores condiciones de adherencia, permitiera obtener hormigones de mejor resistencia a la tracción a igualdad de resistencia a compresión. Los resultados que hemos obtenido, Fig. 3, muestran que ambos áridos dan relaciones análogas entre ambas resistencias. Si existe alguna diferencia, ésta no alcanza a ser detectada a través de la información reunida.

No tenemos una explicación clara para el resultado de Fig. 4 que, por otro lado, indica claramente que la relación entre resistencias a la tracción y a la compresión depende de la dosis de cemento. Se pensó que la dependencia podría atribuirse a diferencias en las relaciones (agua - cemento) - resistencia para las diferentes dosis de cemento; sin embargo, ambas relaciones originales en este caso resultaron prácticamente independientes de la dosis de cemento<sup>8</sup>.

La influencia de las condiciones de conservación y de ensayo en la relación entre resistencias se deriva de la diferente influencia que tienen estos factores en cada una de las resistencias. De las experiencias de GILKEY<sup>9</sup> se sabe que, si de dos probetas mantenidas en curado húmedo hasta los 28 días, una es extraída y ensayada seca, su resistencia a compresión aparecerá aumentada respecto de lo que se obtendrá para la ensayada saturada. Con la resistencia a la tracción, en cambio, sucede lo contrario, la resistencia determinada en la probeta seca es menor. Resultados recientes publicados por BONZEL y KADLECEK<sup>6</sup> muestran que, si bien en el caso de probetas curadas en ambiente húmedo hasta 28 días y luego trasladadas a un ambiente más seco, de 20°C y 65% de humedad relativa, se obtiene en un comienzo un descenso claro en la resistencia a la tracción respecto de la que se había obtenido a 28 días, esta disminución es luego remontada llegando en algunos casos a superarse el valor inicial. Creemos que este punto merece dilucidarse por la importancia práctica que puede tener en el caso de estructuras reales, especialmente pavimentos de hormigón, estanques de agua, etc., cuyo funcionamiento depende en gran medida de su resistencia a la tracción.

### Resultados de mayor importancia

El resultado de mayor importancia es el que se refiere a la relación entre la resistencia de compresión y la de tracción de los hormigones preparados. El conjunto de la información obtenida en el IDIEM, hormigones de distintos tipos de áridos, de cemento y de dosis diferentes, se consideraron juntos con la información obtenida por GONNERMAN y SHUMAN<sup>2</sup>. A ambos conjuntos de resultados que se integran muy satisfactoriamente se ajustó una sola línea de regresión. El resultado general puede examinarse en la Fig. 7. De estos resultados se desprende que la razón entre la resistencia de tracción directa y la resistencia de compresión varía entre 1/10 para las resistencias menores y 1/15 para las mayores. El otro resultado de importancia, se refiere a la acción del secado al aire am-

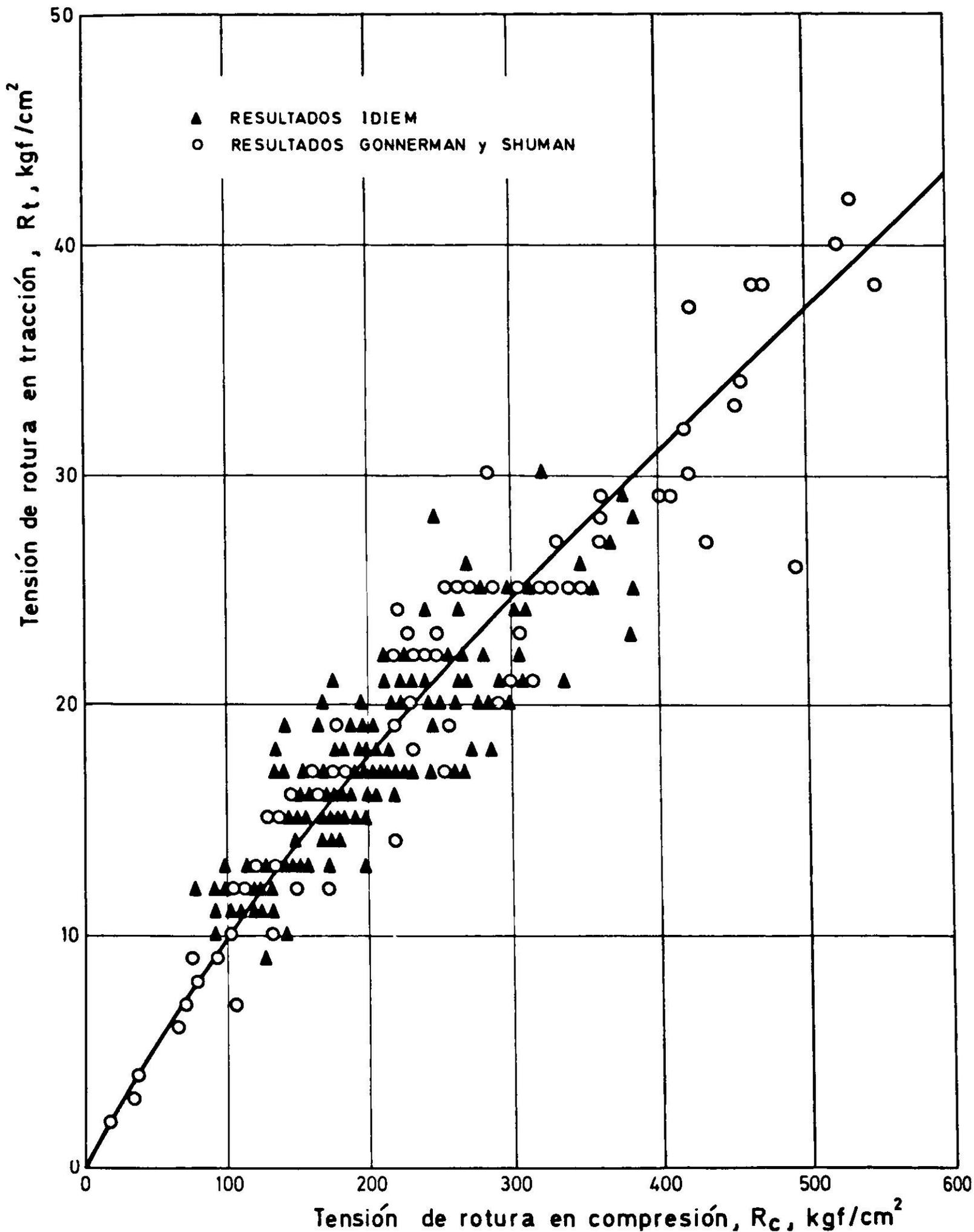


Fig. 7. Relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a la tracción de probetas cilíndricas mantenidas y ensayadas húmedas. Los resultados obtenidos en el IDIEM (Ref. 8) se han considerado junto a los obtenidos por GONNERMAN y SHUMAN (Ref. 2). La fusión entre ambos conjuntos de valores ha resultado muy buena, como puede observarse. La relación entre ambas resistencias varía entre 1/10, para las resistencias bajas, y 1/15 para las altas.

biente de las probetas antes del ensayo. El fenómeno completo merece ser estudiado más a fondo por la trascendencia que pudiera tener para aquellas estructuras donde cuenta la resistencia a la tracción del hormigón.

### AGRADECIMIENTOS

Las investigaciones de que hemos dado cuenta en este artículo tuvieron el respaldo económico del Ministerio de Obras Públicas y Transportes entregado a través de su laboratorio de Vialidad. Agradecemos la comprensión y ayuda del ingeniero Manuel Rodríguez, que dirigía ese laboratorio en la época en que se hicieron las experiencias.

También queremos hacer explícitos nuestro agradecimiento a los directivos de las fábricas de cemento El Melón y Cerro Blanco de Polpaico.

Igualmente queremos dejar constancia de nuestro reconocimiento a SIKA S. A. en la persona de su gerente don José Charó por el interés demostrado en nuestros problemas y su generosa disposición.

### REFERENCIAS

1. MÖRSCH, E. *Teoría y práctica del hormigón armado*, Edit. G. Gili, Barcelona 1948, pp. 55-63.
2. GONNERMAN, H. y SHUMAN, E. Compression, flexure and tension tests of plain concrete. *Proceedings of the American Society for Testing Materials*, part II, vol. 28 (1928), pp. 527-564.
3. BONZEL, L. Über die Biegezugfestigkeit des Betons. *Beton Herstellung und Verwendung*, n° 4 (abril 1963), pp. 179-182; n° 5 (mayo 1963), pp. 227-232.
4. HUGHES, B. P. y CHAPMAN, G. P. Direct tensile test for concrete using modern adhesives. *Bulletin RILEM*, n° 26 (marzo 1965), pp. 77-80.
5. HUGHES, B. P. y CHAPMAN, G. P. The complete stress-strain curve for concrete in direct tension. *Bulletin RILEM*, n° 30 (marzo 1966), pp. 95-97.
6. BONZEL, J. y KADLECEK, V. Einfluss der Nachbehandlung und des Feuchtigkeitszustands auf die Zugfestigkeit des Betons. *Beton Herstellung und Verwendung*, n° 8 (agosto 1970), pp. 351-357.
7. GORODISCHER, R. y CANTIZANO, G. *Tracción pura en el hormigón. Resistencias, deformaciones, relaciones con la resistencia de hendimiento y otras características del hormigón*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, 1966.
8. VASQUEZ, R. y VERGARA, A. *Características resistentes del hormigón ante sollicitaciones de tracción*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, 1969.
9. GILKEY, H. J. The moist curing of concrete. *Engineering News Record*, vol. 119 (octubre 1973), pp. 630-633.

## TENSILE STRENGTH OF CONCRETE

## SUMMARY

*Making use of results from two former investigations about the direct strength of concrete, the authors analyse the influences of type of cement, cement content, moisture content of concrete and shape of aggregates on the ratio between tensile and compressive strength of concrete. It is shown that the ratio varies in the range of 1/15 to 1/10; it is also shown that the moisture content of concrete plays a significant part in the direct tensile strength of concrete.*

## NOTA DE LA DIRECCION

*El señor Moisés Piñeiro F. fue un frecuente colaborador de esta revista y ya había tocado el tema de la resistencia a la tracción del hormigón en alguno de sus trabajos publicados. Por otra parte, dirigió varias investigaciones experimentales sobre ese mismo tema. A fines del año 1972 había reunido la información proveniente de estas diferentes fuentes y redactó un trabajo que sintetizaba los resultados y conclusiones más importantes y lo envió a algunos de sus colaboradores para una discusión previa a la redacción final.*

*Poco tiempo después ocurrió el lamentable fallecimiento de Moisés Piñeiro y temporalmente se perdió el rastro del trabajo. Recientemente, sin embargo, la dirección de esta revista ha podido recuperarlo y lo entrega en la versión presente, que sólo tiene leves modificaciones de forma con respecto a la que Piñeiro había preparado.*

*Nuestra revista se complace en publicar este trabajo como un homenaje póstumo y como reconocimiento a uno de sus más queridos colaboradores.*