

Efecto del tamaño de la probeta y condiciones de carga en el ensayo de tracción indirecta

Effect of specimen size and loading conditions on indirect tensile test results

S. Carmona^(*)

Recepción/Received: 3-IX-07
Aceptación/Accepted: 27-III-08
Publicado online/Online publishing: 19-V-09

RESUMEN

Debido a la dificultad que existe para caracterizar la resistencia a tracción del hormigón por medio del ensayo de tracción directa, se han validado métodos experimentales indirectos para determinar esa propiedad. Uno de esos métodos, el ensayo de tracción indirecta o ensayo Brasileño, se usa ampliamente por su facilidad de ejecución, por la posibilidad de determinarse sobre probetas cúbicas o cilíndricas moldeadas con hormigón fresco y porque también se pueden ensayar testigos de hormigón endurecido.

No obstante, cuando se analizan detenidamente los resultados obtenidos con probetas de distintos tamaños, se observa que la resistencia depende del tamaño de la probeta. Por otra parte, los valores de la resistencia calculados con la expresión propuesta por las normas técnicas vigentes no reflejan las condiciones reales de ejecución del ensayo, sobreestimando la resistencia a la tracción del material.

A partir de los resultados experimentales presentados en este artículo se observa que, modificando levemente la configuración del ensayo y haciendo un ajuste en la ecuación de cálculo de la resistencia, se obtienen valores de la resistencia independientes del tamaño en el rango de diámetros estudiados (45-294 mm).

Palabras clave: ensayo de tracción indirecta, resistencia a la tracción, efecto del tamaño, hormigón.

SUMMARY

Due to the difficulties inherent in the direct measurement of concrete tensile strength, experimental methods have been devised to determine this property indirectly. One such method, the splitting or indirect tensile test, also known as the Brazilian test, is widely used for its convenience and applicability to freshly moulded cubic and cylindrical specimens, as well as to hardened concrete core samples.

Nevertheless, the strength values obtained with this method have been observed to differ with specimen size. Moreover, the strength values calculated with the formula proposed in the existing standards fail to reflect real test conditions and actually overestimate tensile strength.

The experimental results reported in this article show that if the test set up is modified slightly and the equation for calculating strength is adjusted, consistent strength values are obtained, regardless of specimen size, in the range of diameters studied (45 - 294 mm).

Keywords: indirect tensile test, tensile strength, effect of size, concrete.

^(*) Universidad Técnica Federico Santa María (Valparaíso, Chile)

Persona de contacto/Corresponding author: sergio.carmona@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo de tracción indirecta o ensayo Brasileño, consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando la carga de manera uniforme a lo largo de una línea o generatriz hasta alcanzar la rotura. Este procedimiento experimental es ampliamente utilizado para medir la resistencia a tracción del hormigón, debido a que es muy simple, se pueden usar tanto con probetas cilíndricas, ya sean éstas moldeadas o testigos de hormigón endurecido, como cúbicas (1) y ha sido especificado por varias normas y recomendaciones, tales como la ASTM C – 496 (2), NCh 1170 (3), BS 1881-117 (4) y Rilem (5).

Si bien, teóricamente, la carga debe ser aplicada sobre dos líneas generatrices diametralmente opuestas, en la práctica, la carga se aplica sobre dos zonas de ancho finito, materializadas a través de láminas de cartón compacto o madera de 3 mm de espesor. El objetivo de esta lámina es distribuir la carga y evitar efectos locales de concentración de tensiones en posibles puntos de irregularidad geométrica de la probeta. El ancho de esta lámina, designado como $2t$ (Figura 1), conocido como ancho de apoyo o ancho de reparto de la carga, depende de la norma técnica de referencia y, como se puede ver en la Tabla 1, no existe consenso entre las diferentes normas técnicas y recomendaciones respecto a sus dimensiones.

1. INTRODUCTION

The splitting or indirect tensile test, also known as the Brazilian test, consists in compression loading a cylindrical specimen to failure along two opposing diametral lines. This experimental procedure is commonly used to measure concrete tensile strength because of its simplicity and applicability to freshly moulded cubic or cylindrical specimens or core samples of hardened concrete (1) and because it is recommended in a number of standards, including ASTM C-496 (2), NCh 1170 (3), BS 1881-117 (4) and Rilem (5).

While theoretically the load should be applied along two diametrically opposing lines, in practice it is applied to two small arcs of contact across 3 mm thick compact cardboard or wood strips. The purpose of these strips is to spread the load and prevent the local concentration of tension due to geometric irregularities in the surface of the specimen. Their width, designated $2t$ (Figure 1) and called the load support or distribution width, varies from one technical standard to another and, as Table 1 shows, no consensus has yet been reached in this regard.

Tabla 1 / Table 1
Ancho de la zona de carga $2t$, establecido en diferentes normas técnicas.
Width, $2t$, of support area in different technical standards.

Norma Técnica / Standard	Tipo Probeta / Specimen type	Dimensiones / Dimensions		Apoyo / Support	
		d mm	l mm	Material / Material	Ancho / Width $2t$, mm
NCh 1170	Cilindro / Cylinder	150	300	Madera / Wood	15 ± 5
ASTM C – 496	Cilindro / Cylinder	150	300	Madera / Wood	25
BS 1881 – 117	Cilindro / Cylinder	150	300	Madera / Wood	15 ± 2
	Cubo / Cube	100	100	Madera / Wood Acero / Steel	15 ± 5 4 ± 1
		150	150	Madera / Wood Acero / Steel	15 ± 5 6 ± 1
	Prisma / Prism	100	100	Madera / Wood Acero / Steel	15 ± 2 4 ± 1
		150	150	Madera / Wood Acero / Steel	15 ± 2 6 ± 1

Normalmente, el ensayo se realiza bajo control de carga y termina cuando se alcanza la carga máxima, la que se utiliza para calcular la resistencia máxima a la tracción, suponiendo una distribución uniforme de las tensiones de tracción en el plano de carga, de esta forma se tiene [1]:

The test is normally conducted to failure under controlled loading conditions to determine the maximum load. This value is then used to calculate the maximum tensile strength from the following expression, which assumes that the tensile stress is spread evenly across the plane loaded [1]:

$$f_N = \frac{2 P_u}{\pi d l} \quad [1]$$

Donde f_N es la resistencia a tracción indirecta, P_u la carga máxima alcanzada durante el ensayo, d y l son el diámetro y longitud del cilindro, respectivamente.

Where f_N is the splitting tensile strength, P_u the maximum load reached during the test and d and l are the cylinder diameter and length, respectively.

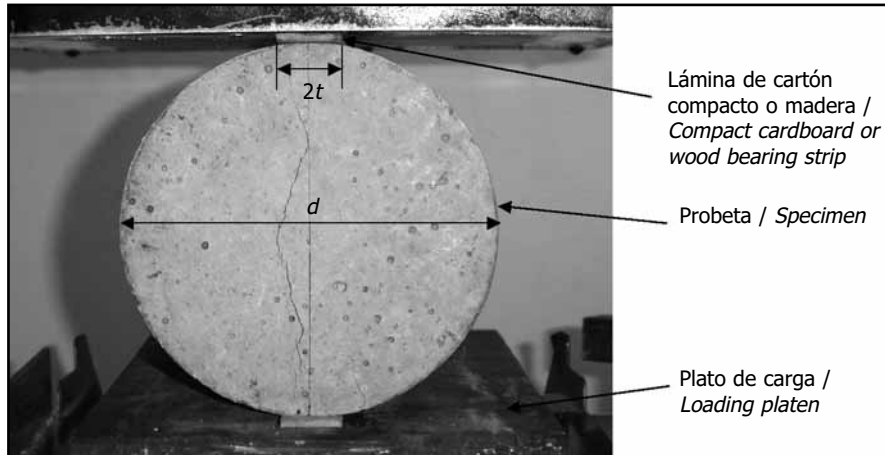


Figura 1. Configuración del ensayo de tracción indirecta.
 Figure 1. Splitting tensile test set up.

La ec. [1], dada por las normas técnicas para el cálculo de la resistencia a la tracción, no considera el ancho de reparto, por el contrario, supone que la carga actúa de manera concentrada sobre una línea o generatriz. Tang *et al.* (6), obtuvieron una expresión para determinar la tensión máxima a la tracción de probetas cilíndricas sometidas a compresión diametral, que considera el ancho de reparto, proponiendo la ecuación [2]:

None of the terms of equation [1], recommended by technical standards to calculate tensile strength, incorporates the support width. On the contrary, the load is assumed to be concentrated on a diametral line. Tang *et al.* (6) developed an equation to compute maximum tensile strength in cylindrical specimens subjected to diametral compression that takes account of support width, as follows [2]:

$$f_T = \frac{2 P_u}{\pi d l} \left[1 - \left(\frac{2t}{d} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad [2]$$

Donde f_T es la resistencia a tracción indirecta, calculada con la ecuación de Tang *et al.* (4) y $2t$ es el ancho de reparto, como se muestra en la Figura 1.

Where f_T is splitting tensile strength and $2t$ is the width over which the load is spread, as shown in Figure 1.

Al igual que en otros tipos de roturas del hormigón, se ha observado que los resultados obtenidos ensayando cilindros de diferentes diámetros dependen del tamaño de la probeta (7). Sin embargo, a diferencia de lo observado en otros tipos de roturas, los resultados obtenidos a través del ensayo de tracción indirecta no muestran una tendencia clara de efecto del tamaño.

As in other types of concrete failure, the results obtained for cylinders of different diameters have been observed to depend on specimen size (7). Contrary to the findings for other types of failure, however, the differences in splitting test results follow no clear trend.

En la Figura 2, se resumen los resultados obtenidos en diferentes investigaciones previas. En ella se presenta la

Figure 2 summarizes the results obtained in several previous studies. The figure plots the diameter of the

resistencia a tracción indirecta (f_N) normalizada por el valor correspondiente al diámetro de 150 mm (f_{N150}), en función del diámetro de las probetas ensayadas. Se observa, que mientras los resultados de Sabnis y Mirza (8), muestran una disminución continua de la resistencia en el rango de tamaño de probetas estudiado (entre 25 y 150 mm), los ensayos de Chen y Yuan (9), presentan un incremento de la resistencia con el aumento del diámetro de la probeta, en el rango entre 76 y 152 mm. Los ensayos de Hasegawa (10), que cubren un amplio rango de tamaños, desde 100 hasta 3.000 mm, exhiben una disminución de la resistencia, seguida de un ligero aumento de éstas.

Bažant *et al.* (11), ensayaron probetas con diámetros entre 20 y 500 mm. Sus resultados muestran que, para diámetros pequeños (menores que 150 mm), la resistencia disminuye con el incremento del tamaño, situación que se revierte para diámetros mayores a 150 mm. Por otra parte, los resultados de los ensayos realizados por Rocco *et al.* (12), sobre probetas prismáticas, no presentan efecto del tamaño en el rango entre 37 y 300 mm. En una investigación posterior, Rocco *et al.* (13) concluyen que el efecto del tamaño está condicionado al ancho de reparto sobre el que se aplica la carga.

specimens tested versus splitting tensile strength (f_N), normalized to the value corresponding to a diameter of 150 mm (f_{N150}). Note that while Sabnis and Mirza (8) found a continuous decline in strength in the range of specimens studied (from 25 to 150 mm), Chen and Yuan (9) reported an increase in strength with specimen diameter when the dimensions involved were 76 to 152 mm. Hasegawa (10), who studied a wide range of sizes (100 to 3,000 mm), reported that while strength initially declined with increasing specimen diameter, it subsequently rose slightly from the nadir.

Bažant et al. (11) tested specimens with diameters of 20 to 500 mm. Their findings showed that for small diameters (under 150 mm), strength declined with increasing size, whereas the pattern reversed for diameters of over 150 mm. At the same time, according to the tests conducted by Rocco et al. (12) on prismatic specimens, size had no effect on the results in a range of 37 to 300 mm. In a later study, however, Rocco et al. (13) concluded that the effect of size depended on the width over which the load was distributed

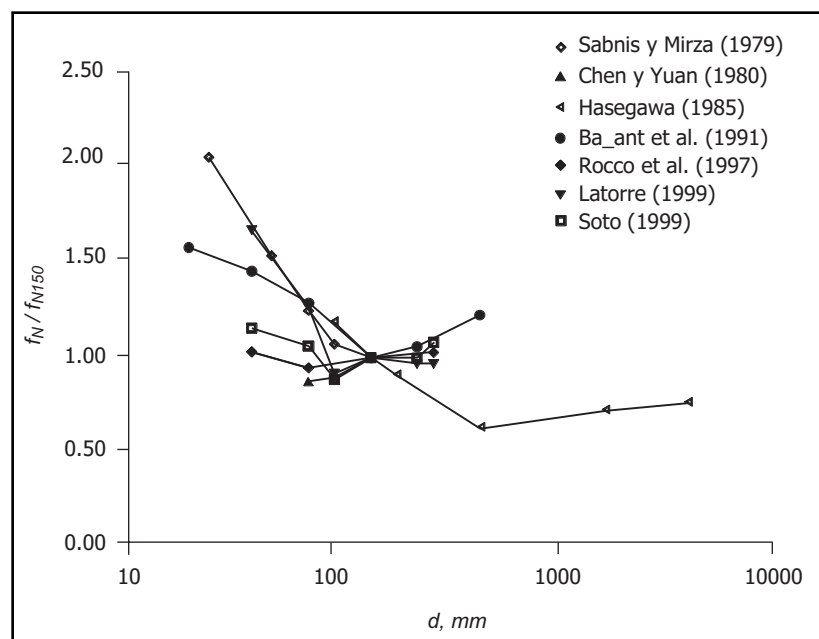


Figura 2. Tendencias de efecto del tamaño observadas en investigaciones previas.
Figure 2. Effect of size on tensile strength results observed in previous studies.

2. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN PROPUESTA

A través de la presente investigación, se estudiará experimentalmente la influencia del ancho de reparto de la carga y el efecto del tamaño de la probeta en la resistencia a tracción indirecta del hormigón.

2. SCOPE OF THE RESEARCH PROPOSED

The present study explores the effect of support width and specimen size on splitting tensile test results for concrete.

Para tal efecto, se moldearán 4 series de probetas cilíndricas de 6 diámetros diferentes (entre 45 y 294 mm). Cada una de estas series se ensayará con diferentes anchos de apoyo: 1) ancho libre: a través de estos ensayos se podrá determinar el ancho real de la zona de contacto entre la probeta y los platos de carga; 2) $2t = 25$ mm: éste es el ancho recomendado por la norma ASTM C – 496; 3) $2t \rightarrow 0$, corresponde al caso hipotético considerado por las normas, y 4) $2t = d/6$, este el ancho de reparto relativo promedio obtenido en los ensayos de la Serie 1.

Los resultados se analizarán comparando los valores de la resistencia obtenidos a través de las ecuaciones [1] y [2].

3. DETALLES EXPERIMENTALES

3.1. Material estudiado

Para desarrollar la investigación propuesta se elaboró un hormigón (identificado como NSC–10), con un cemento Portland Pozzolánico chileno, clasificado como IP según la norma ASTM C-595 (14). Se utilizó grava de origen granítica de tamaño máximo $t_{max} = 10$ mm. La proporción en peso de los componentes fue cemento:agua:agregado = 1: 0,44: 3,4. El detalle de la dosificación se encuentra en la Tabla 2, junto a las propiedades del hormigón estudiado, las que se determinaron de acuerdo a los procedimientos normalizados y utilizando probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm.

Para desarrollar la presente investigación, se elaboraron cuatro series de probetas de diámetros: $d = 45, 71, 105, 153, 233$ y 294 mm. La longitud de todas las probetas fue de 100 mm, esto corresponde a una longitud igual a 5 veces el tamaño máximo del agregado pétreo utilizado.

Todas las probetas de una serie, 10 de cada diámetro, se moldearon con hormigón proveniente de la misma amasada, los moldes se llenaron en sólo una capa y se compactaron en una mesa vibradora con una frecuencia de 50 Hz. Después de 24 h, las probetas se desmoldaron y guardaron en una cámara húmeda ($HR \geq 95\%$ y 20 ± 3 °C) hasta la fecha de ensayo.

To this end, four series of cylindrical specimens with six different diameters (from 45 to 294 mm) were prepared. Each series was tested with different support widths: 1) freely chosen width: these tests were conducted to determine the actual area of the surface contact between the specimen and the loading platens; 2) $2t = 25$ mm: this is the width recommended in standard ASTM C-496; 3) $2t \rightarrow 0$, the hypothetical case defined in the standard; and 4) $2t = d/6$, the mean relative support width obtained in the series 1 tests.

The strength values obtained with equations [1] and [2] under the foregoing assumptions were compared.

3. EXPERIMENTAL

3.1. Material

The research was conducted with concrete (identified as NSC-10) prepared from a type IP pozzolanic Portland cement manufactured in Chile to ASTM C-595 (14) specifications. Granite gravel with a maximum size, t_{max} , of 10 mm was used as aggregate. The cement:water:aggregate ratio by weight was 1:0.44:3.4. Dosage details are given in Table 2, together with the properties of the concrete studied, which were determined via standard procedures on 150 x 300-mm cylindrical specimens.

Four series of specimens were prepared for this study, with the following diameters: $d = 45, 71, 105, 153, 233$ and 294 mm. All specimens were 100 mm long, i.e., five times the maximum size of the stone aggregate used.

All the specimens in each series, ten of each diameter, were prepared with concrete from the same batch. The moulds were filled in a single lift and consolidated on a vibrating table at a frequency of 50 Hz. The specimens were removed from the moulds after 24 h and stored in a humidity chamber ($RH \geq 95\%$ and 20 ± 3 °C) until tested.

Tabla 2 / Table 2
 Características del material estudiado.
 Characteristics of the materials studied.

Composición/Composition (cantidades por m ³)/(amounts per m ³)	NSC - 10
Cemento/Cement (kg)	500
Agua/Water (L)	220
Arena/Sand (kg)	979
Grava/Gravel (kg)	631
Características/Characteristics	
Asentamiento de cono/Slump (cm)	5
Resistencia a compresión/Compressive strength, f_c (MPa)	45
Resistencia a tracción indirecta/Splitting tensile strength, f_N (MPa)	3.1

3.2. Ensayos y resultados experimentales

Todos los ensayos se realizaron mediante control de carga en una prensa hidráulica Toni Technik modelo 1142/0230 de 3 MN de capacidad, calibrada para trabajar en los rangos 0 - 600 kN y 0 - 3.000 kN, con precisiones de 0,1 kN y 1 kN, respectivamente. Para cada diámetro, la velocidad de aplicación de la carga se ajustó para que la duración de cada ensayo estuviese en el rango comprendido entre 2 y 3 minutos.

Las series de probetas se ensayaron utilizándose los siguientes apoyos:

- Serie 1: Ancho libre.
- Serie 2: Ancho según norma ASTM C - 496, $2t = 25$ mm.
- Serie 3: Ancho según hipótesis de la norma ASTM C - 496, $2t \rightarrow 0$
- Serie 4: Ancho medio real de contacto $2t = d/6$

Para materializar el ancho de la zona de contacto o de carga, se utilizaron láminas de madera de 3 mm de espesor. En la Serie 1 se colocó una lámina de 100 mm de ancho entre los platos de carga y la probeta. En la Tabla 3 se presentan los resultados de mediciones del ancho real de la zona de contacto entre los platos de carga y las probetas de diferentes diámetros, efectuadas sobre las láminas de madera utilizadas en la Serie 1, obteniéndose un valor promedio del orden de $2t/d = 0,162$. Este valor es equivalente a la condición normalizada de la norma ASTM C - 496, donde se establece un ancho de carga de 25 mm para probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro, de modo que $2t/d = 1/6 = 0,166$. En el caso de la Serie 3, la carga se aplicó sobre las probetas a través de 2 cuñas colocadas diametralmente opuestas entre los platos de carga de la prensa y la probeta. Considerando los resultados previos, para los ensayos de la Serie 4, se incorporó una barra de carga de ancho $2t = d/6$, entre la probeta y los platos de carga.

3.2. Tests and results

All the tests were conducted on a 3-MN Toni Technik model 1142/0230 testing machine, calibrated to operate in the 0 - 600 and 0 - 3,000 kN ranges at a precision of 0.1 kN and 1 kN, respectively. The loading rate was adjusted to each diameter to establish test times of two to three minutes.

The test series were conducted using the following bearing strips:

- Series 1: width chosen for this study, 100 mm
- Series 2: width as specified in ASTM C-496; $2t = 25$ m.
- Series 3: width as per ASTM C-496 hypothesis; $2t \rightarrow 0$
- Series 4: actual mean contact width, $2t = d/6$

Three millimetre thick wooden bearing strips were used to define the contact or support area. In series 1 a 100-mm wide strip was placed between the loading platens and the specimen. Table 3 gives the actual contact widths measured between the loading platens and the specimens of different diameters in Series 1. The mean value found was on the order of $2t/d = 0.162$. This value is equivalent to the standard figure given in ASTM C-496, which calls for a support width of 25 mm for cylindrical specimens 150 mm in diameter, i.e., $2t/d = 1/6 = 0.166$. In series 3, the load was applied to specimens across two wedges set between the loading platens and the specimens in diametrically opposing positions. In light of the foregoing results, for the series 4 tests, a loading bar with a width of $2t = d/6$ was placed between the specimen and the loading platens.

Tabla 3 / Table 3
Ancho promedio de la zona de carga medidos en la Serie 1.
Mean width of the contact area measured in Series 1.

d mm	$2t$ mm	$2t/d$
45	10	0.22
71	10	0.14
105	15	0.14
153	20	0.13
233	40	0.17
294	50	0.17

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de la resistencia a tracción indirecta en cada una de las series ensayadas, se realizó utilizándose la

4. ANALYSIS OF RESULTS

The splitting tensile strength was found for each series with both equation [1] (ASTM C-496) and equation [2]

ec. [1], dada por la norma ASTM C - 496, y la ec. [2], propuesta por Tang *et al.*, identificándose las resistencias como f_N y f_T , respectivamente. Para aplicar la ec. [2], se utilizaron los valores de $2t$ presentado en la Tabla 3.

En la Tabla 4, se presentan los valores de la resistencia a tracción indirecta calculados a partir de los resultados de la Serie 1. Además, en ella se entrega la relación que existe entre la resistencia de los diferentes diámetros ensayados y la probeta de 153 mm de diámetro, el que se considera como diámetro normalizado. Se puede ver que, con relación a la ecuación propuesta por Tang *et al.*, la norma sobre estima, entre el 3% y 7%, la resistencia a tracción del hormigón, siendo mayor la sobrestimación en el diámetro menor.

En la Figura 3, se grafica el efecto del tamaño sobre la resistencia calculada con la ec. [2], relativo a la resistencia de la probeta de 153 mm de diámetro. Como se puede ver, en esta Serie no se observa una tendencia clara de efecto del tamaño.

Tang *et al.*, and denominated f_N and f_T , respectively. The $2t$ values given in Table 3 were used for the equation [2] calculations.

Table 4 shows the splitting tensile strength values calculated from the series 1 findings. It also gives the relationship between the diameters tested and a standard 153-mm diameter specimen. Note that compared to the calculation proposed by Tang *et al.*, the formula set out in the standard overestimated concrete tensile strength by from 3 to 7%, with the widest gap found for the smallest diameter.

The effect of specimen size on strength calculated with equation [2] is shown in Figure 3, where series 1 specimen size is plotted against the f_T/f_{T153} ratio. As the figure shows, no clear size-induced trend was observed in this series.

Tabla 4 / Table 4
 Resultados de los ensayos de la Serie 1.
 Series 1 test results.

d mm	f_N MPa	f_T MPa	f_N / f_T	f_N / f_{N153}	f_T / f_{T153}
45	4.10 ± 0.10	3.80 ± 0.10	0.93	1.30	1.24
71	3.56 ± 0.08	3.45 ± 0.08	0.97	1.13	1.12
105	2.91 ± 0.09	2.82 ± 0.09	0.97	0.92	0.92
153	3.15 ± 0.09	3.07 ± 0.09	0.97	1.00	1.00
233	3.85 ± 0.07	3.68 ± 0.07	0.96	1.22	1.20
294	3.39 ± 0.07	3.24 ± 0.07	0.96	1.08	1.06

En la Tabla 5 se presentan los resultados del análisis de la Serie 2, ensayada siguiendo lo establecido en la ASTM C - 496. En esa Tabla también se presentan los valores de la resistencia calculados considerando el ancho de la zona de carga con la ec. [2]. Para este cálculo se consideró el valor real de $2t$ dado en la Tabla 3, para los diámetros $d = 45, 71, 105$ y 153 mm, y para los diámetros $d = 233$ y 294 mm se utilizó el valor $2t = 25$ mm, correspondiente al ancho de la banda de cartón colocada entre los platos de carga y la probeta.

Table 5 gives the findings for series 2, tested as laid down in standard ASTM C-496. The table also shows the strength values calculated with equation [2], i.e., taking account of the width of the loaded area. In these calculations, the actual value of $2t$ given in Table 3 was used for diameters $d = 45, 71, 105$ and 153 mm, whereas for diameters $d = 233$ and 294 mm, $2t$ was assigned a value of 25 mm, the width of the cardboard strip placed between the loading platens and the specimen.

Tabla 5 / Table 5
 Análisis de resultados de la Serie 2.
 Analysis of Series 2 results.

d mm	f_N MPa	$2t$ mm	f_T MPa	f_N / f_T	f_N / f_{N153}	f_T / f_{T153}
45	5.53 ± 0.12	10	5.12 ± 0.11	1.080	2.01	1.91
71	4.00 ± 0.11	10	3.88 ± 0.11	1.031	1.45	1.45
105	3.40 ± 0.09	15	3.30 ± 0.09	1.030	1.24	1.23
153	2.75 ± 0.10	20	2.68 ± 0.10	1.026	1.00	1.00
233	3.54 ± 0.11	25	3.48 ± 0.11	1.017	1.29	1.30
294	3.25 ± 0.10	25	3.21 ± 0.10	1.012	1.18	1.20

Como se puede ver en la Figura 4, los resultados de esta Serie presentan la tendencia descrita por Bažant *et al.* (11), con un marcado efecto del tamaño para probetas de diámetro menor que 150 mm y un incremento de la resistencia, a un valor relativamente constante, en los diámetros mayores. En esta Serie, el uso de la ec. [1] sobreestima el valor de la resistencia en un 8% para las probetas de menor diámetro. Por otra parte, el valor de la resistencia de la probeta de menor diámetro prácticamente duplica la resistencia alcanzada por la probeta de diámetro normalizado.

La Serie 3 se ensayó reproduciendo las condiciones de carga supuestas por la norma, es decir, la carga se aplicó sobre dos líneas diametralmente opuestas. Por razones de orden práctico, la carga se aplicó sobre un ancho real $2t = 2$ mm para todos los diámetros. Si se realiza el análisis considerando ese valor de $2t$, se tienen valores relativos de $2t/d$ entre 0,044 y 0,007, para los cilindros de 45 y 294 mm de diámetro, respectivamente. De este modo, los factores de corrección de la resistencia, según la ec. [2], varían entre 0,997 y 0,999, para los diámetros de 45 y 294 mm, respectivamente. Considerando que estos valores son cercanos a 1, se ha despreciado el efecto del ancho real de la zona de carga y sólo se ha considerado el análisis con la ec. [1]. Los resultados de esta Serie se pueden ver en la Tabla 6.

As Figure 4 shows, the results for this Series followed the pattern described by Bažant *et al.* (11), with strength declining notably with increasing specimen size in specimens smaller than 150 mm, but rising with size to a relatively constant value in larger specimens. In this Series, the use of equation [1] led to overestimates in strength values of up to 8% in the smallest specimens. And in fact the strength recorded for the smallest diameter specimen nearly doubled the strength found for the standard cylinder.

Series 3 was tested to the load conditions specified in the standard, i.e., the load was applied on two diametrically opposing lines. For practical reasons, the real loading width for all specimen diameters was $2t = 2$ mm. Assuming that value for $2t$, the $2t/d$ values obtained were 0.044 and 0.007 for 45- and 294-mm cylinders, respectively. Consequently, the strength correction factors, according to equation [2] ranged from 0.997 to 0.999 for diameters of 45 and 294 mm, respectively. Given the proximity of these values to 1, the effect of the actual width of the contact area was disregarded, and only the calculations performed with equation [1] were considered. The results for this Series are given in Table 6.

Tabla 6 / Table 6
Resultados alcanzados por la Serie 3.
Series 3 test results.

d mm	f_N MPa	$f_N / f_{N153} = f_T / f_{T153}$
45	3.78 ± 0.11	1.52
71	3.11 ± 0.12	1.25
105	2.75 ± 0.09	1.11
153	2.48 ± 0.10	1.00
233	2.19 ± 0.11	0.88
294	2.11 ± 0.09	0.85

En la Figura 5, se grafican las resistencias relativas (f_T/f_{T153}) en función del diámetro de las probetas. Se puede ver que los resultados exhiben un claro efecto del tamaño, disminuyendo la resistencia conforme aumenta el diámetro de la probeta. Este efecto del tamaño es muy fuerte para las probetas de diámetros pequeños y se hace menos significativo para las probetas de diámetros mayores.

Relative strength (f_T/f_{T153}) is plotted against specimen diameter in Figure 5. The findings show that size had an obvious impact, with strength falling as specimen diameter rose. This effect, particularly intense for the smallest diameter specimens, slackened for the larger cylinders.

Finalmente, se presentan los resultados de los ensayos de la Serie 4. Esta serie se ensayó utilizando un ancho relativo de la zona de carga $2t/d = 1/6$. Para garantizar un ancho de la zona de carga constante durante todo el ensayo, la carga se aplicó por medio de 2 barras de acero colocadas entre los platos de carga y la probeta. Los resultados de Serie se pueden ver en la Tabla 7.

Finally, Series 4 was tested with a relative loaded area width of $2t/d = 1/6$. To guarantee a constant support width throughout the test, the load was applied to two bars positioned between the loading platens and the specimen. The results for this series are given in Table 7.

Debido a que en la Serie 4 se utilizó un ancho relativo de la zona de carga constante, la relación $f_N/f_T = 1,04 = \text{constante}$, para todos los diámetros. Además, para cada diámetro, la relación $f_N/f_{N153} = f_T/f_{T153}$.

A partir de los resultados de la Tabla 7 y el gráfico de la Figura 6, se observa una ausencia de efecto del tamaño, obteniéndose un valor promedio de la resistencia a tracción indirecta $f_T = 2,93$ MPa. El valor de la resistencia obtenido por medio de la ecuación de la norma es $f_N = 3,03$ MPa. Este último valor es un 4% mayor que el valor de la resistencia obtenido considerando el ancho de la zona de aplicación de la carga.

Since the support width used in Series 4 was constant throughout, the expression $f_N/f_T = 1.04 = \text{constant}$ was valid for all diameters. Moreover, for each diameter, $f_N/f_{N153} = f_T/f_{T153}$.

Further to the results in Table 7 and the graph in Figure 6, size exerted no effect and the mean splitting tensile strength found was $f_T = 2.93$ MPa. The strength value obtained with the expression recommended in the standard was $f_N = 3.03$ MPa. This value was 4% higher than the strength found when the width of the loaded area was factored into the equation.

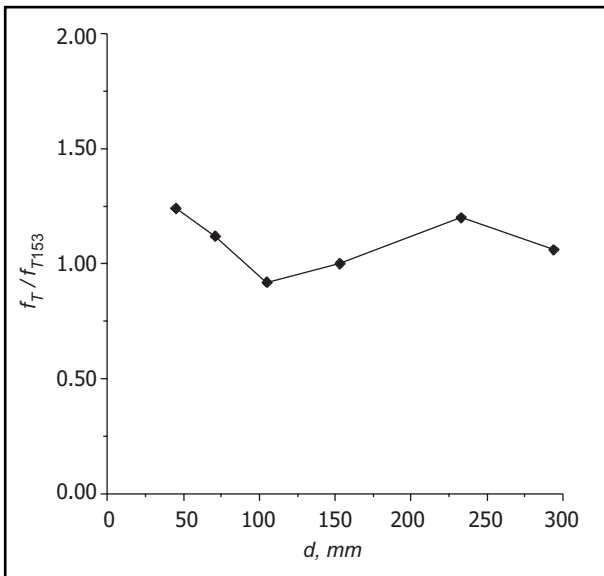


Figura 3. Resultados ensayos Serie 1.
 Figure 3. Series 1 test results.

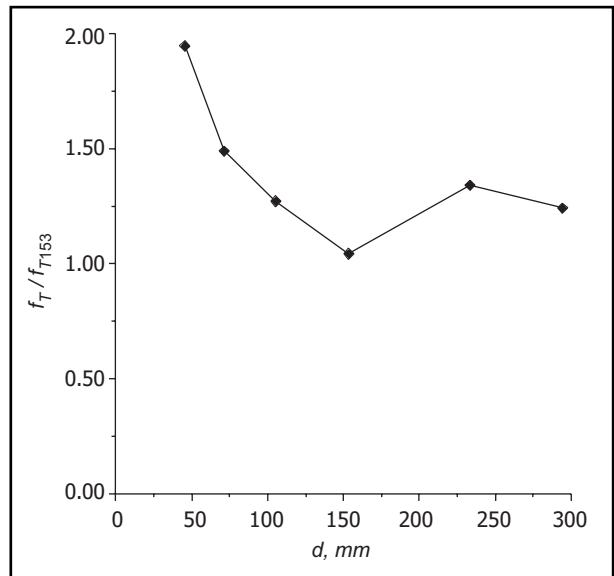


Figura 4. Resultados ensayos Serie 2.
 Figure 4. Series 2 test results.

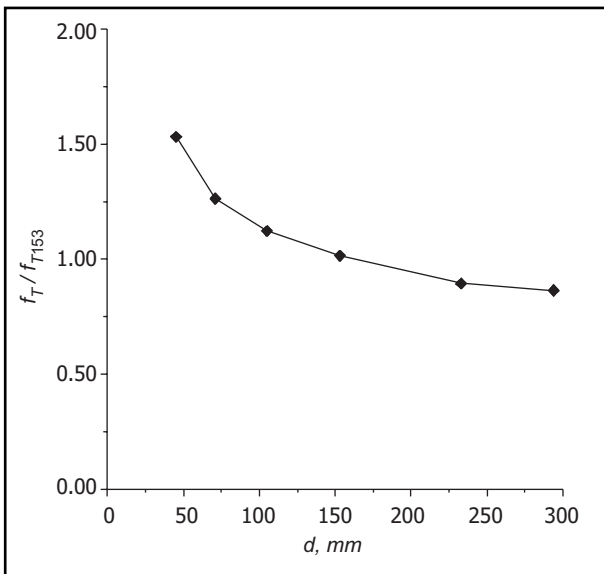


Figura 5. Resultados ensayos Serie 3.
 Figure 5. Series 3 test results.

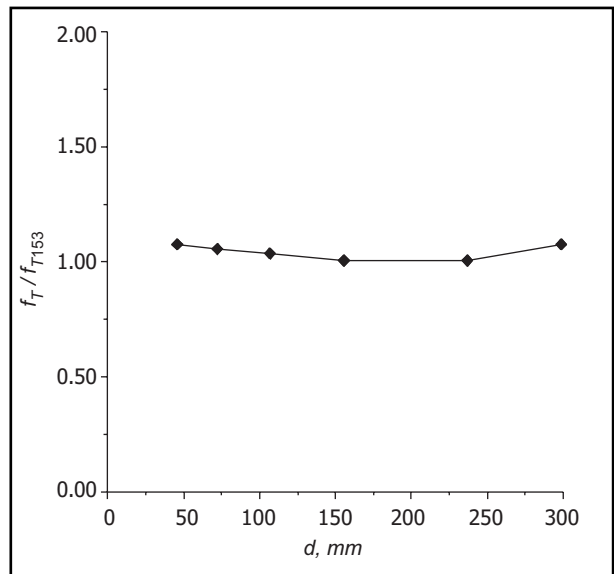


Figura 6. Resultados ensayos Serie 4.
 Figure 6. Series 4 test results.

Tabla 7 / Table 7
Análisis de la Serie 4.
Analysis of Series 4 results.

d mm	f_N MPa	$2t$ mm	f_T MPa	f_{T1} / f_{T153}
45	3.18 ± 0.09	7.5	3.05 ± 0.09	1.07
71	2.94 ± 0.06	11.8	2.82 ± 0.06	1.05
105	3.07 ± 0.06	17.5	2.95 ± 0.06	1.03
153	2.98 ± 0.07	25.0	2.86 ± 0.07	1.00
233	2.98 ± 0.08	38.8	2.86 ± 0.08	1.00
294	3.18 ± 0.06	49.0	3.05 ± 0.06	1.07

5. CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos realizados de acuerdo a lo señalado por la norma vigente muestran un marcado efecto del tamaño para probetas de diámetro menor que 150 mm, lo que debería considerarse para el caso de ensayo de probetas de diámetro no normalizado, por ejemplo, testigos de hormigón endurecido.

Un claro efecto del tamaño se puede observar en los resultados de los ensayos realizados siguiendo la hipótesis de la norma ($2t \rightarrow 0$). En esta Serie, la resistencia disminuye conforme aumenta el diámetro del cilindro ensayado, siendo más fuerte el efecto para probetas de diámetro menor que 150 mm.

A partir de los resultados de la Serie 4, se observa que, restringiendo convenientemente el ancho de la zona de carga, en función del diámetro de la probeta, desaparece el efecto del tamaño y se obtiene una resistencia prácticamente constante para todo el rango de diámetros estudiado.

Considerando los resultados obtenidos, se recomienda modificar la configuración del ensayo de tracción indirecta, incorporando barras de carga de ancho relativo $2t = d/6$, como se muestra en la Figura 7 y calcular la resistencia a tracción por medio de la siguiente ecuación [3]:

$$f_T = 0,61 \frac{P_U}{d l} \quad [3]$$

donde f_T es la resistencia a tracción indirecta, P_U la carga máxima alcanzada durante el ensayo, d y l son el diámetro y largo de probeta, respectivamente. Esta expresión incluye el efecto del ancho de la zona de aplicación de la carga y es válida para un ancho relativo de la zona de carga $2t/d = 1/6$, para otros anchos de zona carga se recomienda utilizar la ec. [2], propuesta por Tang *et al.*

5. CONCLUSIONS

The results of the tests conducted to existing specifications show that specimen size has a notable effect on strength values in specimens with a diameter of under 150 mm. This fact should be borne in mind when testing non-standard size specimens, such as hardened concrete core samples.

Size had a clear impact on the results when the tests were conducted pursuant to the standard hypothesis ($2t \rightarrow 0$). In this Series, strength declined as the diameter of the cylinder tested rose, and this effect was more intense in specimens with diameters under 150 mm.

The findings for Series 4 show that if the width of the contact area is limited to a dimension defined in terms of specimen diameter, the size effect can be eliminated and a practically constant strength value obtained for the full range of diameters studied.

In light of these results, the splitting tensile strength test set up should be modified by using loading bars with a width of $2t = d/6$, as shown in Figure 7, and tensile strength should be calculated from the following equation [3]:

*Where f_T is the splitting tensile strength, P_U the maximum load recorded during the test, and d and l the cylinder diameter and length, respectively. This expression accommodates the effect of the contact area width and is valid for a width of $2t/d = 1/6$. For other widths, equation [2], proposed by Tang *et al.*, is recommended.*

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la colaboración del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, en el desarrollo de esta investigación y el financiamiento recibido de Cementos Polpaico S.A., del Grupo Holcim.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author wishes to thank the Federico Santa María technical University's Materials Testing Laboratory at Valparaíso, Chile, for the assistance provided. This research was funded by Cementos Polpaico, S. A. a Grupo Holcim company.

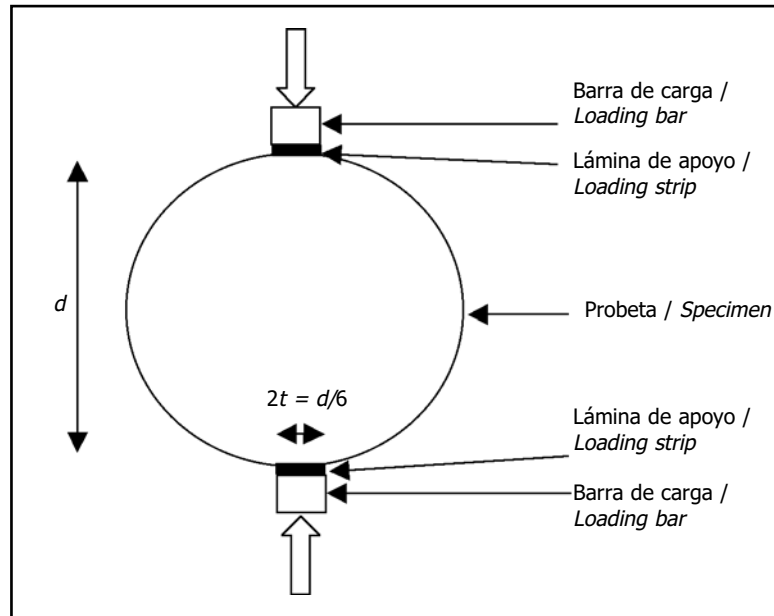


Figura 7. Configuración de ensayo propuesta para reducir el efecto del tamaño.
Figure 7. Test set up proposed to reduce the size effect.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Neville, A. M.: *Properties of Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., London (1996), p. 844.
- (2) ASTM International: ASTM C-496, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02 – Concrete and Aggregates (2002), pp. 281-284.
- (3) Instituto Nacional De Normalización: NCh 1170 Of. 77, *Hormigón – Ensayo de tracción por hendimiento* (1977), p. 7.
- (4) British Standards: BS 1881 – 117, *Testing concrete Method for determination of tensile splitting strength* (1983), p. 6.
- (5) Rilem: *Tension splitting of concrete specimen, CPC6, 1975*, Rilem Technical Recommendation for the Testing and Use of Construction Materials, E&FN Spon, London (1994), pp. 21-22.
- (6) Tang, T.; Shah, S. P. y Ouyang, C.: "Fracture Mechanics and Size Effect of Concrete in Tension", *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 118 (1992), pp. 3169-3185.
- (7) Bažant, Z. P.; Ozbolt, J. y Eligehausen, R.: "Fracture size effect: review of evidence for concrete structures", *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 120 (1994), pp. 2377-2398.
- (8) Sabins, G. M. y Mirza, S. M.: "Size effects in model concretes?", *ASCE Journal of the Structural Division*, vol. 106 (1979), pp. 1007-1020.
- (9) Chen, W. F. y Yuan, R.: "Tensile strength of concrete: Double-Punch test". *ASCE Journal of the Structural Division*, vol. 106 (1980), pp. 1673-1693.
- (10) Hasegawa, T.: *Size effect on splitting tensile strength of concrete*, Proceedings JCI (1985), pp. 309-312.
- (11) Bažant, Z. P.; Kazemi, M. T.; Hasegawa, T. y Mazars, J.: "Size effect in Brazilian split-cylinder test. Measurement and analysis", *ACI Material Journal*, vol. 88 (1991), pp. 325-332.
- (12) Rocco, C.; Guinea, G. V.; Planas, J. y Elices, M.: "The effect of the boundary conditions on the cylinder splitting strength", *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Ed. F. H. Wittmann, Aedificatio Publishers, Alemania (1995), pp. 75-84.

- (13) Rocco, C.; Guinea, G. V.; Planas, J. y Elices, M.: "Efecto del tamaño de probeta sobre la Resistencia a la tracción medida con el ensayo brasileño", XV Asamblea Técnica Nacional de la ATEP, *Hormigón y Acero* – 2º Trimestre (1997), pp. 47-63.
- (14) ASTM International: ASTM C-595: *Standard specification for blended hydraulic cements*. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.01 – Cement, Gypsum and Lime. (2002) pp. 323-329.

* * *