



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN:
CORRELACIÓN ENTRE RESULTADOS DE PROBETAS CÚBICAS Y PROBETAS
CILÍNDRICAS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

RAFAEL SEBASTIAN ALDANA ORTIZ

**PROFESOR GUÍA:
GERARDO DÍAZ RODENAS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA
CARLOS AGUILERA GUTIERREZ**

**SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2008**

AGRADECIMIENTOS

Estar escribiendo los agradecimientos de mi memoria y en consecuencia darla por terminada, es uno de los momentos más significativos de mi vida y que en algún momento pensé que nunca llegaría, pero gracias a mucha gente logré estar realizando.

Seba, hijo mío, tú eres la fuerza que me llevó a recorrer este camino, gracias por tu alegría y paciencia.

Xime, ésta es un nueva etapa que cumplimos juntos, ya hemos pasado muchas y vendrán muchas más. Gracias por escucharme, ayudarme, levantarme y aconsejarme, sin ti esto no tendría el mismo valor y sin ti nunca lo hubiera logrado.

Papás y hermano, mi familia que siempre ha estado conmigo, independiente de los buenos y malos momentos. Papás, este es el fin de una empresa que empezaron mucho tiempo atrás y que ustedes dieron forma y valor, esto es suyo.

Profesor Gerardo Díaz, gracias por sus consejos y paciencia.

En especial a quiero agradecer a Gonzalo y Jonathan, si pudiera dividir esta memoria en tres lo haría, parte de ella es de ustedes, jamás olvidaré el esfuerzo y dedicación que pusieron al ayudarme a realizar los hormigones y ensayos que dieron lugar a este trabajo de título.

A mis compañeros, jefes y amigos del IDIEM, gracias por su colaboración, consejos y ayuda cuando la necesité.

En resumen gracias.....

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: RAFAEL ALDANA ORTIZ
FECHA: 17-07-2008
PROF. GUÍA: SR. GERARDO DIAZ R.

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN:
CORRELACIÓN ENTRE RESULTADOS DE PROBETAS CÚBICAS Y PROBETAS
CILÍNDRICAS.”**

El control de calidad de las obras de hormigón se basa principalmente en los resultados de ensayos a compresión de probetas cúbicas representativas del hormigón colocado. En el caso de hormigones de alta resistencia es común recurrir a ensayos de compresión sobre probetas cilíndricas y utilizando la relación de conversión que establece la norma NCh170.Of1985, “Hormigón – Requisitos generales”, obtener los valores de resistencia referidos a probetas cúbicas normales.

Considerando que los hormigones que se suministran actualmente a las obras han experimentado variaciones significativas con respecto a los que se producían en los años 80, resulta de interés actualizar los criterios y especialmente las relaciones que se requieren para un adecuado control de aceptación de los hormigones.

Para lograr este objetivo se confeccionan 15 hormigones de prueba, dos coladas de 160 l para cada hormigón, con relaciones A/C desde 1,0 hasta 0,30, que permitieron moldear 18 probetas cúbicas y 21 probetas cilíndricas, para ensayar a las edades de 7 y 28 días.

Adicionalmente, se estudia la influencia del tipo de refrentado (capping v/s rectificado) en los valores de resistencia a compresión cilíndrica obtenida.

Como resultado de esta experiencia, se obtiene que el rango de resistencias de los hormigones estudiados van desde los 110 kg/cm² hasta los 1150 kg/cm² y dentro de este rango se establecen correlaciones existentes entre el ensayo de probetas cúbicas y cilíndricas a 7 y 28 días de edad.

Del análisis de los resultados obtenidos se deduce una nueva relación para la conversión de resistencias a compresión de probeta cilíndrica a probeta cúbica y que los cilindros preparados con refrentado en sus caras dan resistencias mayores que los cilindros preparados con rectificado en sus caras.

INDICE

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	7
CAPITULO 2: OBJETIVOS.....	10
2.1 Objetivo General	10
2.2 Objetivos específicos	10
CAPITULO 3: ALCANCE DEL PROYECTO.....	11
CAPITULO 4: ANTECEDENTES	12
4.1 Reseña teórica.....	12
4.2 Conversiones existentes	13
4.2.1 Norma chilena.....	13
4.2.2 Norma europea	14
4.2.3 Jin-Keun Kim y Seong-Tae Yi	16
4.2.4 Concrete Manual.....	17
4.2.5 Experiencia IDIEM.....	18
CAPITULO 5: METODOLOGÍA	21
5.1 Dosificaciones utilizadas	21

5.2	Confección del hormigón y de probetas.....	22
5.3	Moldes y materias primas utilizadas.	24
5.3.1	Moldes utilizados.....	24
5.3.2	Materias primas utilizadas.....	24
5.4	Ensayos.....	27
5.4.1	Ensayos previos a la confección.	27
5.4.2	Ensayos al hormigón fresco.....	27
5.4.3	Ensayos al hormigón endurecido.....	28
5.5	Preparación de las probetas para el ensayo compresión.	29
5.5.1	Probetas cúbicas.....	29
5.5.2	Probetas cilíndricas.....	29
CAPITULO 6: RESULTADOS.....		32
6.1	Ensayos previos.....	32
6.2	Ensayos al hormigón fresco.....	33
6.3	Ensayo a compresión.....	34
6.3.1	Ensayo a 7 días de edad.....	34

6.3.2	Ensayo a 28 días de edad.....	35
CAPITULO 7: ANALISIS DE RESULTADOS.....		37
7.1	Ensayo a compresión a 7 días de edad.....	37
7.2	Ensayo a compresión a 28 días de edad.....	42
7.3	Comparación resultados a 7 y 28 días.....	47
7.4	Ensayo a compresión de cilindros rectificadas y refrentadas.....	52
CAPITULO 8: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS		55
CAPITULO 9: BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS		59
ANEXOS		61
	Anexo 1: Resultados a 7 días ensayo a compresión.....	61
	Anexo 2: Resultados a 28 días ensayo a compresión.....	66
	Anexo 3: Resultado ensayo a compresión probetas cilíndricas refrentadas.....	71

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

En Chile la construcción se basa en la utilización de hormigón, el cual, de acuerdo a la norma chilena NCh170.Of1985: Hormigón – Requisitos generales, se define como un material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava, cemento y eventualmente aditivos y adiciones, que en proporciones adecuadas, al fraguar y endurecer, adquiere resistencia.

Como bien dice la definición antes mencionada, el hormigón tiene como principal característica la resistencia que adquiere y, en consecuencia, es sumamente importante controlar que el hormigón colocado en una estructura cumpla con la resistencia especificada por los calculistas.

Considerando lo anterior, la norma NCh170.Of1985 indica en el punto 14.4 que se debe hacer el ensayo a compresión de probetas de hormigón confeccionadas en obra, las cuales podrán ser de geometría cilíndrica o cúbica, siendo las más utilizadas las cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, las cúbicas de 20 cm de arista y las cúbicas de 15 cm de arista. (Fig. 1)



Fig. 1: Tipo de probetas ensayo a compresión

Considerando la variedad de probetas que se utilizan, la misma norma fija la probeta cúbica de 20 cm de arista como cubo normal, es decir, todos los resultados obtenidos en probetas cilíndricas y en cúbicas de 15 cm de arista, deben ser transformados a resultados en probeta cúbica de 20 cm de arista, entregando distintas tablas de conversión.

Por mucho tiempo no se dio importancia al tema de la transformación de los resultados, pues en la gran mayoría de los casos las muestras se confeccionaban en probetas cúbicas de 20 cm de arista. Sin embargo, actualmente cada vez es más utilizada la probeta cilíndrica, debido a características tan simples como el menor peso de los moldes y menor área de carga, facilitando el muestreo en obra y permitiendo ensayar resistencias más altas con las mismas máquinas de ensayo, respectivamente.

Las razones respecto a qué probeta utilizar pueden ser muy variadas, sin embargo, los clientes del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM), principalmente empresas premezcladoras de hormigón, han presentado la siguiente inquietud: *considerando que la norma chilena transforma los resultados del ensayo a compresión de probetas cilíndricas a cúbicas sumando 50 kg/cm² sobre los 200 kg/cm² ¿Conviene ensayar en probeta cilíndrica? ¿Qué pasa sobre los 600 kg/cm², ya que hasta este valor se entrega conversión?*

Considerando todo lo anterior y las nuevas tecnologías utilizadas, tanto en las máquinas de ensayo a compresión como en la fabricación del hormigón, cabe preguntarse: ¿está desactualizada la norma NCh170.Of 1985?

Por todo lo expuesto en los párrafos anteriores, el IDIEM de la Universidad de Chile encuentra necesario dar una respuesta a las preguntas de los clientes y aportar conocimientos actuales respecto al tema de la transformación de resultados del ensayo a compresión de probeta cilíndrica a cúbica de 20 cm de arista.

Para esto, el presente trabajo aborda el tema desde un punto de vista experimental,

realizando ensayos con ambos tipos de probetas para distintos valores de resistencias (logradas mediante la variación de la relación agua-cemento y manteniendo constante el tipo de áridos y cemento).

Por otro lado, se analiza la posible influencia del tipo de preparación de las caras de probetas cilíndricas en los resultados de los ensayos a compresión.

CAPITULO 2: OBJETIVOS.

2.1 Objetivo General

Aportar conocimientos respecto al ensayo a compresión del hormigón, en particular en la conversión de resultados del ensayo a compresión de probetas cilíndricas, de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, a cúbicas de 20 cm de arista.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la correlación entre los resultados del ensayo a compresión a 7 días de probetas cúbicas y probetas cilíndricas para hormigones con resistencia entre 200 y 900 kg/cm².
- Determinar la correlación entre los resultados del ensayo a compresión a 28 días de probetas cúbicas y probetas cilíndricas para hormigones con resistencia entre 200 y 900 kg/cm².
- Establecer la relación entre las correlaciones encontradas a 7 días y 28 días de edad.
- Establecer, en una primera aproximación, la relación entre los resultados del ensayo a compresión de probetas cilíndricas preparadas en sus caras con refrentado (capping) y las preparadas con rectificado.

CAPITULO 3: ALCANCE DEL PROYECTO

En el resultado del ensayo a compresión existen muchas variables que afectan el resultado, siendo los principales: el tipo de árido, el cemento, tipo de curado y edad de ensayo.

En particular, en este estudio experimental se estudia el comportamiento de las resistencias para valores que sobrepasan los 600 kg/cm^2 , lo cual restringe a utilizar en todos los hormigones sólo gravilla y arena, cemento de alta resistencia y curado bajo agua.

Este estudio analiza los resultados del ensayo a compresión sólo para hormigones confeccionados con los materiales y procedimientos definidos en el capítulo 5.

Por otra parte, el estudio experimental de las resistencias para cilindros rectificadas y refrentados en sus caras, no pretende ser un estudio acucioso del tema, sino dar luces respecto al tema e incentivar futuras investigaciones.

CAPITULO 4: ANTECEDENTES

La norma chilena entrega una tabla de conversión de resultados de ensayos a compresión de probetas cilíndricas a cúbicas, sin embargo, no explica la razón de esta diferencia. Este capítulo pretende dar nociones teóricas de por qué se produce esta diferencia en los resultados y mostrar otras conversiones existentes.

4.1 Reseña teórica

Cuando una probeta de hormigón es cargada uniaxialmente a la compresión, ésta tiende a expandirse lateralmente. En consecuencia, se produce una fuerza de fricción entre la placa de carga de la máquina de ensayo y la probeta. Esta fuerza de fricción crea una fuerza compresiva lateral en la probeta que es responsable de la formación de un cono en la falla.

La influencia de esta fuerza de fricción en el tipo de falla dependerá directamente de la esbeltez de la probeta (esbeltez es igual a la razón altura/diámetro). En las probetas de esbeltez igual a 1 se produce una falla por corte, mientras que en las de esbeltez igual a 2 se produce una falla por tracción. En la figura 2 se muestran los distintos tipos de falla que produce la fuerza de fricción sobre probetas con distinta esbeltez.

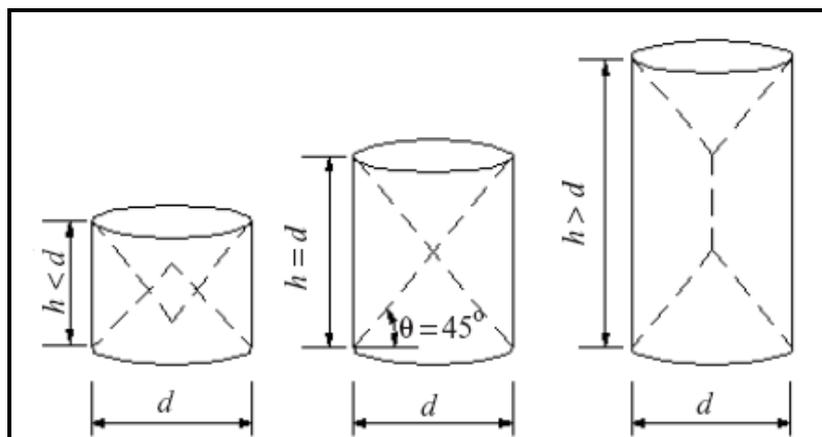


Fig. 2: Tipo de falla para distintas esbeltez.

De lo anterior se desprende que la forma de la probeta no influiría en la diferencia de resultados, sino que la esbeltez (razón) de éstas. En el caso particular que se estudia, el cubo tiene una esbeltez igual a 1 y el cilindro una esbeltez igual a 2, puesto que $h=2d$.

Dado que el hormigón tiene mayor resistencia al corte que a la tracción, al ensayar un cubo se produce mayor resistencia que al ensayar un cilindro, pero así mismo la falla que se produce en el cilindro se puede considerar más representativa de lo que ocurre en las estructuras.

4.2 Conversiones existentes

A continuación se presentan 5 transformaciones propuestas de resultados de probetas cúbicas a cilíndricas. Las dos primeras corresponden a la normativa existente en Chile y la Unión Europea, las siguientes dos corresponden a estudios extranjeros y la última corresponde a una experiencia realizada por IDIEM.

4.2.1 Norma chilena

En Chile, la norma que establece los criterios de transformación de resultados es la NCh170.Of1985, la cual se entrega en la Tabla N° 1.

La gran limitación de esta transformación es que considera valores de resistencia en probeta cúbica de 20 cm de arista sólo hasta los 600 kg/cm^2 , lo que genera conflictos respecto a la transformación a utilizar para valores superiores a éste. Una forma de enfrentar esta limitación es extrapolando los resultados de la tabla.

Tabla N° 1: Transformación de resistencias entregada por NCh170.Of1985

Resistencia cúbica (kg/cm²)	Resistencia cilíndrica (kg/cm²)
50	40
100	80
150	120
200	160
250	200
300	250
350	300
400	350
450	400
500	450
550	500
600	550

4.2.2 Norma europea

La norma europea, en el documento EN 206-1:2005. Concrete – Part 1 – Specification, performance, production and conformity, presenta una de las transformaciones más actuales.

Esta norma muestra transformaciones hasta 1150 kg/cm², sin embargo, presenta la limitación que su probeta de referencia es el cubo de 15 cm de arista.

Otra de las características interesantes de esta norma es que define tres tipos de hormigón de acuerdo a su densidad: livianos, cuya densidad es menor a 2000 kg/m³, normales, cuya densidad se encuentra entre 2000 y 2600 kg/m³ y pesados, cuya densidad es mayor a 2600 kg/m³. Además, genera dos tablas de transformación de resultados, una para el hormigón liviano y otra para el hormigón normal y pesado, las

cuales se presentan en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2: Transformación de resultados norma EN 206-1:2005

Hormigón normal y pesado			Hormigón liviano		
Tipo de Hormigón	Resistencia cilíndrica	Resistencia Cúbica 15 cm	Tipo de Hormigón	Resistencia cilíndrica	Resistencia Cúbica 15 cm
	kg/cm2	kg/cm2		kg/cm2	kg/cm2
C8/10	80	100	LC8/9	80	90
C12/15	120	150	LC12/13	120	130
C16/20	160	200	LC16/18	160	180
C20/25	200	250	LC20/22	200	220
C25/30	250	300	LC25/28	250	280
C30/37	300	370	LC30/33	300	330
C35/45	350	450	LC35/38	350	380
C40/50	400	500	LC40/44	400	440
C45/55	450	550	LC45/50	450	500
C50/60	500	600	LC50/55	500	550
C55/67	550	670	LC55/60	550	600
C60/75	600	750	LC60/66	600	660
C70/85	700	850	LC70/77	700	770
C80/95	800	950	LC80/88	800	880
C90/105	900	1050			
C100/115	1000	1150			

4.2.3 Jin-Keun Kim y Seong-Tae Yi¹

En el artículo “Application of size effect to compressive strength of concrete members”, estos autores proponen la siguiente ecuación para predecir el resultado del ensayo a compresión de probetas cilíndricas de hormigón, considerando como valor de referencia la resistencia característica.

$$f_0 = 0,4 \cdot f'_c / [1 + (h - d)/50]^{1/2} + 0,8 \cdot f'_c \quad (1)$$

Donde:

f_0 : es la resistencia del cilindro a compresión en MPa.

f'_c : es la resistencia característica a compresión en MPa.

h : es la altura del cilindro en mm.

d : es el diámetro del cilindro en mm.

Al utilizar la ecuación (1) para el caso particular de $h = 2d$, se obtiene:

$$f_0 = f'_c \quad (2)$$

Y para el caso particular de $h = d$, se obtiene:

$$f_0 = 1,20 \cdot f'_c \quad (3)$$

De la ecuación (2) y (3) se puede decir que el caso de esbeltez 2 ($h = 2d$) corresponde al 100% de la resistencia característica y que el caso de la esbeltez 1 corresponde al 120% de la resistencia característica.

¹ Sadhana Vol. 27, Part 4, August 2002, pp. 467–484.

Considerando que la diferencia entre el resultado de cubos y cilindros no dependería de la geometría de la probeta sino de su esbeltez, se podría utilizar la formula propuesta por estos autores para transformar de probeta cilíndrica a cúbica y decir que:

$$f_{cub} = 1,20 \cdot f_{cil} \quad (4)$$

Donde:

f_{cil} : es la resistencia cilíndrica a compresión en kg/cm^2 .

f_{cub} : es la resistencia cúbica a compresión en kg/cm^2 .

4.2.4 Concrete Manual

Este manual, editado en el año 1975 por el Ministerio del Interior de Estados Unidos, entrega información de ingeniería y propone métodos y procedimientos para administrar especificaciones técnicas y contratos de obras de hormigón.

En particular, en el anexo 33 entrega un gráfico de conversión de resultados de resistencias cilíndricas a compresión considerando como referencia el cilindro de esbeltez 2. (Fig. 3)

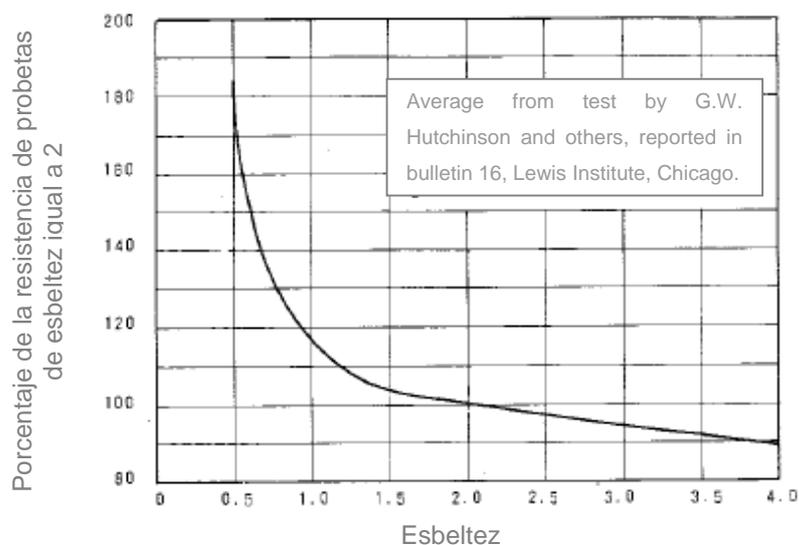


Fig. 3: Gráfico Concrete Manual

Considerando este gráfico, se puede obtener que la resistencia de una probeta de esbeltez 1 es igual a 1,16 veces la de esbeltez 2.

Además, si se considera que el resultado no depende de la geometría de la probeta, se podría extrapolar esta conversión para probetas cúbicas de 20 cm de arista y cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, es decir:

$$f_{cub} = 1,16 \cdot f_{cil} \quad (5)$$

Donde:

f_{cil} : es la resistencia cilíndrica a compresión en kg/cm².

f_{cub} : es la resistencia cúbica a compresión en kg/cm².

Cabe destacar, que este manual fue editado en el año 1975 y en consecuencia ignora los avances, tanto en la confección como en el ensayo del hormigón, de los últimos 30 años. En particular, no considera los hormigones de altas prestaciones que actualmente se confeccionan.

4.2.5 Experiencia IDIEM

Como ya se mencionó anteriormente, en la actualidad existe mucho interés por parte de las empresas premezcladoras de hormigón por obtener una curva de correlación entre la resistencia de cubos de 20 cm de arista y cilindros normales. Por este motivo, el año 2007, el IDIEM, en conjunto con una empresa premezcladora, realizó una experiencia de muestreo en paralelo de probetas cúbicas y cilíndricas para tres tipos de hormigón confeccionado para una de las obras que esta empresa abastecía.

En el Gráfico N° 1, se muestran los resultados obtenidos de esta experiencia, los cuales permitieron obtener la siguiente relación lineal entre las resistencias de las probetas cúbicas y cilíndricas:

$$f_{cub} = 1,01 \cdot f_{cil} + 2,07 \quad (6)$$

Donde:

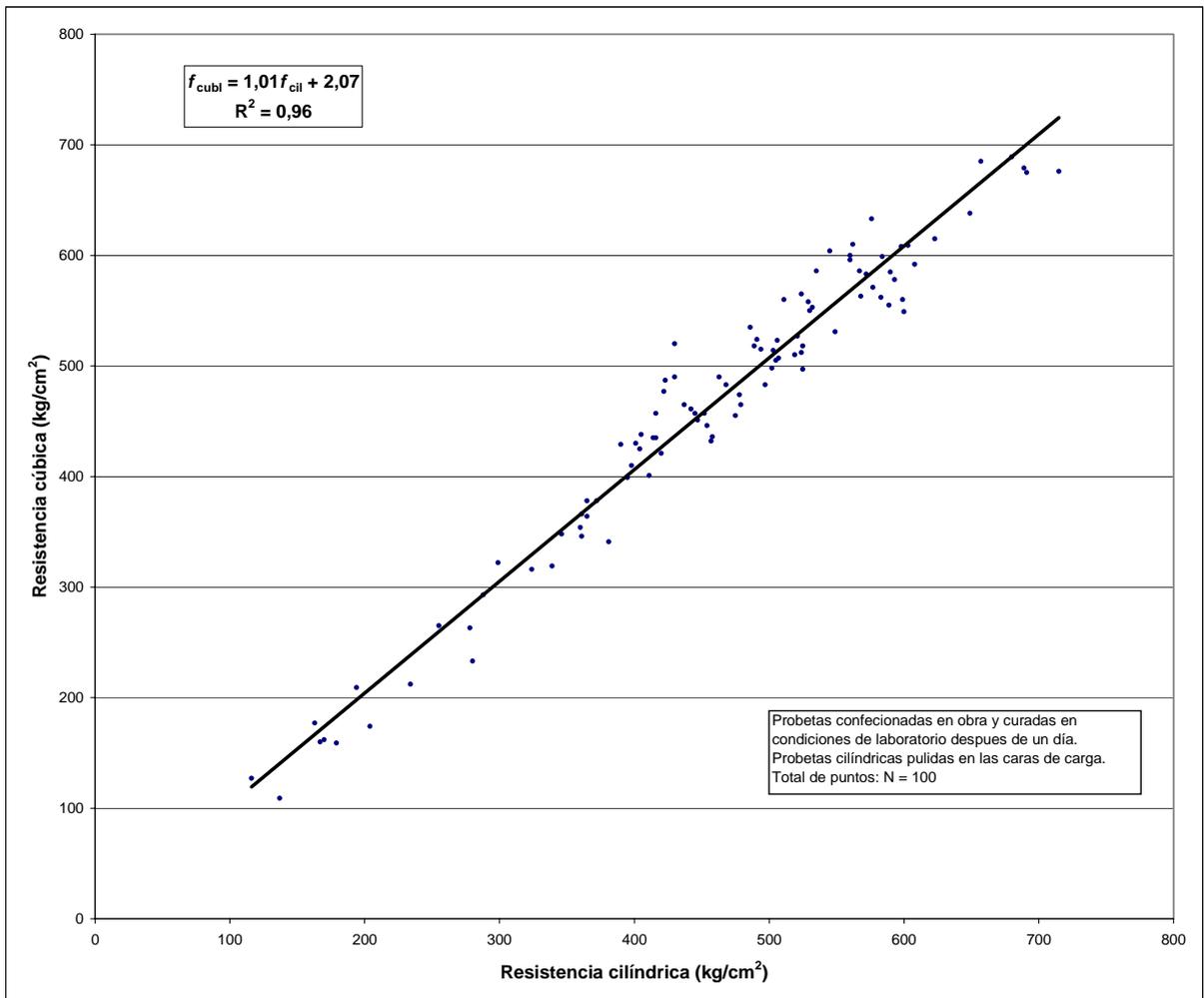
f_{cil} : es la resistencia cilíndrica a compresión en kg/cm².

f_{cub} : es la resistencia cúbica a compresión en kg/cm².

Esta experiencia muestra que independiente de la probeta utilizada, el resultado es prácticamente el mismo, ya que la constante de la recta es 2,07 kg/cm² y la pendiente es apenas de un 1,0% mayor de la que se presentaría al ser iguales los resultados (1,00).

Cabe destacar que los resultados obtenidos son válidos sólo para los hormigones muestreados en esa obra y bajo las condiciones de muestreo y estadía que allí existen, por lo tanto, la ecuación (6) no es aplicable en otras condiciones.

Gráfico N° 1: Resistencia cilíndrica versus cúbica (Experiencia IDIEM)



CAPITULO 5: METODOLOGÍA

A continuación se describe la metodología utilizada para la confección de las probetas y la realización de los ensayos.

5.1 Dosificaciones utilizadas

Se confeccionan 15 tipos de hormigón, con relaciones agua cemento (A/C): 0.98, 0.83, 0.77, 0.71, 0.59, 0.58, 0.54, 0.51, 0.48, 0.45, 0.42, 0.39, 0.36, 0.33 y 0.30.

Las dosificaciones utilizadas para la confección del hormigón se detallan en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3: Dosificación.

ITEM	Relación A/C	Cemento	Agua	Gravilla	Arena	Aditivo Base	Súper plastificante	Microsilíce
		(kg)	(l)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
1	0,98	200	197	869	1062	1,20	-	-
2	0,83	226	188	858	1048	1,36	-	-
3	0,77	260	200	849	1037	1,56	-	-
4	0,71	277	197	844	1032	1,66	-	-
5	0,59	294	174	840	1027	1,76	-	-
6	0,58	311	181	836	1021	1,87	0,80	-
7	0,54	328	177	831	1016	1,97	0,97	-
8	0,51	345	176	827	1011	2,07	1,14	0,35
9	0,48	362	174	823	1005	2,17	1,31	0,69
10	0,45	379	171	818	1000	2,27	1,49	1,04
11	0,42	396	167	814	995	2,38	1,66	1,38
12	0,39	413	162	809	989	2,48	1,83	1,73
13	0,36	430	156	805	984	2,58	2,00	2,07
14	0,33	447	148	801	979	2,68	2,17	2,42
15	0,30	464	140	796	973	2,78	2,34	2,76

5.2 Confección del hormigón y de probetas.

Para cada tipo hormigón, se confeccionan un total de 21 probetas cilíndricas y 18 probetas cúbicas (Fig. 4), lo cual implica que el volumen de hormigón que se debe confeccionar es de 320 litros (se considera un 25% de pérdida en la confección de las probetas y el hormigón utilizado para los ensayos del hormigón fresco), los cuales, debido a la capacidad de la mezcladora, se confeccionan en 2 coladas de 160 litros. La confección del hormigón se hace de acuerdo a la norma NCh1018EOf.1977. Hormigón – Preparación de mezclas de prueba en laboratorio.

Cada colada será destinada a una edad de ensayo, de este modo, la primera colada se utiliza para la confección de las probetas que son ensayadas a compresión a 7 días de edad y la segunda, para las ensayadas a 28 días de edad.

La confección de las probetas se realiza de acuerdo a la norma NCh1017Of.1975 Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción.



Fig. 4: Confección de probetas.

La cantidad de probetas que se ensayan en cada edad se resumen en la tabla N° 4.

Tabla N° 4: Distribución de probetas por edad.

Tipo de probeta	Edad de ensayo	
	7 días	28 días
Cúbica	9	9
Cilíndrica rectificada	9	9
Cilíndrica refrentada	0	3
Total	18	21

Debido a la gran cantidad de probetas y la capacidad del laboratorio, el curado inicial de las probetas es a intemperie con cubierta plástica.

Una vez transcurridas 20 horas desde su confección, las probetas son desmoldadas e identificadas (Fig. 5). Luego, se trasladan a piscinas para realizar el curado bajo agua con temperatura controlada en 20 ± 3 °C (Fig. 6).



Fig. 5: desmolde e identificación de probetas.



Fig. 6: Curado bajo agua.

5.3 Moldes y materias primas utilizadas.

5.3.1 Moldes utilizados

Los moldes que se utilizan para la confección de las probetas corresponden a los utilizados comúnmente por IDIEM y cuentan con verificación que asegura el cumplimiento de las especificaciones establecidas en la norma chilena NCh1017Of.1975. Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción.

Para la confección de las probetas se utilizan moldes cúbicos metálicos de 20 cm. de arista (Fig. 7) y moldes cilíndricos metálicos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. (Fig. 8).

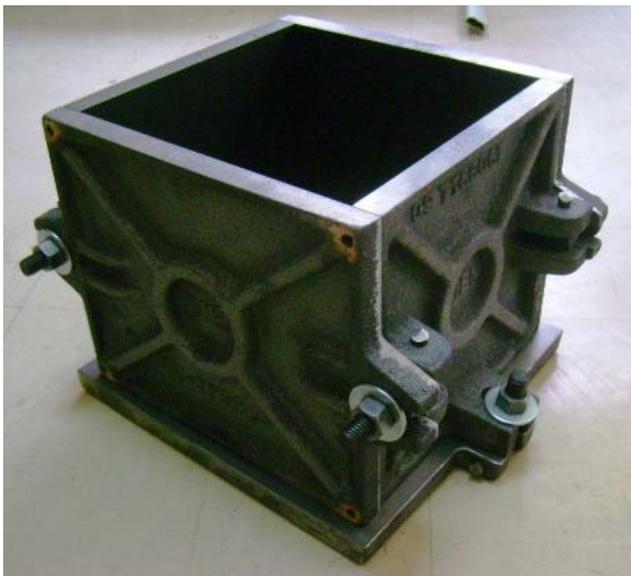


Fig. 7: Molde cúbico



Fig. 8: Molde cilíndrico

5.3.2 Materias primas utilizadas

Para la confección de todos los tipos hormigón se utilizan siempre las mismas materias primas, las cuales se detallan a continuación:

- Cemento

Se utiliza un cemento clasificado como Portland Puzolánico clasificado de Alta Resistencia según NCh148.Of1968 Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales.

Las propiedades del cemento utilizado se resumen en la Tabla N° 5.

Tabla N° 5: Propiedades del cemento.

Propiedad	Valor
Contenido de Puzolana (%)	16
Densidad real (g/cm ³)	2,95
Superficie específica BLAINE (cm ² /gr)	5200
Fraguado inicial (minutos)	90
Fraguado final (minutos)	150

- Áridos

Los áridos utilizados son de procedencia Río Maipo sector Nos. Las características de los áridos se presentan en las tablas N° 6 y N° 7:

Tabla N°6: Granulometría y modulo de finura de los áridos.

Tamiz	Árido	
	Gravilla	Arena
1 1/2"		
1"	100	
3/4"	99	
1/2"	52	
3/8"	23	100
Nº 4	3	93
Nº 8	0	71
Nº 16		54
Nº 30		37
Nº 50		18
Nº 100		7
Módulo de finura	6,75	2,97

Tabla N° 7: Propiedades de los áridos.

Propiedad	Árido	
	Gravilla	Arena
Densidad suelta (kg/m ³)	1529	1645
Densidad compactada (kg/m ³)	1613	1784
Finos por lavado (%)	0,3	3
Absorción (%)	1,04	1,75
Huecos (%)	43,7	35,8
Partículas Chancadas (%)	84	-
Laja (%)	0,46	-

- Agua

El agua utilizada es potable.

- Aditivos

Se utilizan tres aditivos:

- a) Aditivo base.
- b) Aditivo Súper plastificante.
- c) Aditivo mineral a base de micro sílice compactado y seco.

5.4 Ensayos

Además del ensayo a compresión, se realizan ensayos previos a la confección del hormigón, los cuales permiten dosificar exactamente el hormigón y determinar las condiciones de las materias primas y de laboratorio, y ensayos al hormigón fresco, los cuales permiten caracterizar el tipo de hormigón confeccionado.

5.4.1 Ensayos previos a la confección.

Previo a la confección del hormigón se realizan los siguientes ensayos:

- a) Cálculo de porcentaje de humedad de los áridos. Este dato permite calcular de manera exacta el agua necesaria para obtener la relación A/C buscada.
- b) Medición de temperatura del:
 - Ambiente.
 - Agua.
 - Arena
 - Cemento

5.4.2 Ensayos al hormigón fresco

Luego de confeccionar el hormigón y antes de confeccionar las probetas se realizan los

siguientes ensayos al hormigón fresco:

- a) Asentamiento del cono de Abrams según norma NCh1019.Of1974. Hormigón – Determinación de la docilidad. Método del asentamiento del cono de Abrams.
- b) Temperatura del hormigón.
- c) Densidad aparente del hormigón fresco de acuerdo a la norma NCh 1564Of.1979 Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco.
- d) Contenido de aire de acuerdo a la norma NCh1564.Of1979 Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco.

5.4.3 Ensayos al hormigón endurecido

Se realiza el ensayo a compresión de acuerdo a la norma NCh1037.Of1977 Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.

Las máquinas de ensayo que se utilizan son dos, dependiendo de la resistencia esperada en probeta cúbica de 20 cm de arista:

- Toni Technik de carga máxima de 300 toneladas, se utiliza para las resistencias esperadas inferiores a 750 kg/cm^2 en probeta cúbica de 20 cm de arista. (Fig. 9)
- Losenhausen de carga máxima 500 toneladas, se utiliza para las resistencias esperadas superiores a 750 kg/cm^2 en probeta cúbica de 20 cm de arista. (Fig. 10)



Fig. 9: Máquina Toni Technik



Fig. 10: Máquina Losenhausen

5.5 Preparación de las probetas para el ensayo compresión.

5.5.1 Probetas cúbicas

Para el ensayo a compresión de las probetas cúbicas no se necesita preparación, esto ya que el molde utilizado permite asegurar la planitud, perpendicularidad y paralelismo de las caras. Cabe destacar que la probeta cúbica se ensaya en cualquiera de los ejes perpendiculares al del llenado del molde.

5.5.2 Probetas cilíndricas

Debido a que el ensayo a compresión de las probetas cilíndricas se realiza en el mismo eje de llenado del molde, es necesario preparar sus caras, para asegurar la planitud, perpendicularidad y paralelismo de las mismas.

Por una parte, los 9 cilindros de cada tipo de hormigón, que se utilizan para la comparación con las probetas cúbicas, se rectifican. Este procedimiento consiste en pulir las caras con una máquina rectificadora (Fig. 11), la cual, mediante un dispositivo de sujeción, asegura la planitud, perpendicularidad y paralelismo de las mismas (Fig. 12).



Fig. 11: Rectificado de cilindro.



Fig. 12: Cilindro rectificado.

Por otra parte, el refrentado (capping) de los 3 cilindros de cada tipo de hormigón se realiza de acuerdo a la norma NCh1172.Of1978 Hormigón – Refrentado de probetas (Fig. 13) y se utiliza una mezcla de 30% de pomacita y 70% de azufre.



Fig. 13: Refrentado de cilindro

La procedencia de los materiales utilizados es:

Pomacita: Pique Lo Prado, Obra Metro de Santiago, Constructora OHL.

Azufre: MONTEURKABE

Para validar la resistencia de esta mezcla, se confeccionan 9 probetas cúbicas de 5 cm

de arista las cuales son ensayadas a compresión a 30 min, 60 min y 90 min de edad.

Los resultados de la validación se muestran en la Tabla N° 8.

Tabla N° 8: Validación resistencia mezcla de refrentado.

Probeta N°	Edad (min)	Carga máxima (kN)	Resistencia (kg/cm²)	Promedio (kg/cm²)
1	30	62,00	248	250
2		62,30	249	
3		63,00	252	
1	60	80,20	321	345
2		97,70	391	
3		81,00	324	
1	90	113,00	452	456
2		118,50	474	
3		110,75	443	

Estos resultados justifican el uso de rectificado para resistencias sobre los 450 kg/cm², ya que para valores más altos se supone que el refrentado falla antes que la probeta.

CAPITULO 6: RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos previos y los correspondientes al hormigón fresco y al hormigón endurecido. El análisis de los resultados se presenta en el siguiente capítulo.

6.1 Ensayos previos

En la Tabla N° 9 se presentan los resultados de los ensayos para los ajustes de la dosificación previos a la confección del hormigón.

Tabla N° 9: Resultados ensayos previos.

Humedad		Temperatura			
Arena	Gravilla	Ambiente	Agua	Arena	Cemento
(%)		(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
8,2%	0,6%	20,2	18,8	19,0	20,8
6,0%	1,0%	22,0	20,3	19,7	23,6
10,3%	1,6%	18,9	20,0	19,7	21,0
5,8%	0,4%	20,7	19,6	19,6	20,7
3,2%	0,8%	20,3	20,1	19,8	21,0
5,8%	1,0%	20,3	20,2	19,4	18,9
5,8%	1,0%	20,3	20,2	19,4	18,9
10,3%	1,6%	20,0	19,0	19,6	19,3
12,5%	1,7%	20,4	19,7	19,8	18,9
11,4%	1,0%	20,5	20,1	19,7	19,3
11,4%	1,0%	20,3	20,0	19,8	19,2
8,2%	1,3%	20,3	20,2	19,5	19,2
7,6%	0,3%	20,0	20,0	19,8	19,8
8,2%	1,3%	20,4	19,8	19,7	19,5
5,8%	1,0%	20,3	20,0	19,5	18,9

6.2 Ensayos al hormigón fresco.

Los resultados de los ensayos al hormigón fresco se resumen en la Tabla N° 10.

Tabla N° 10: Resultados ensayos al hormigón fresco.

A/C	Asentamiento		Densidad (kg/m ³)	Contenido de Aire	Temperatura colada 1 (°C)	Temperatura colada 2 (°C)
	Colada 1 (cm)	Colada 2 (cm)				
0,98	8,0	8,0	2343	1,50%	24,0	24,2
0,83	8,0	7,0	2376	1,50%	23,3	24,1
0,77	6,5	7,0	2481	2,10%	23,2	23,1
0,71	7,5	8,0	2372	1,30%	23,8	24,1
0,59	9,0	11,0	2386	1,70%	23,8	24,2
0,58	7,5	8,0	2366	1,60%	24,1	24,0
0,54	8,0	8,0	2383	1,80%	24,1	24,0
0,51	8,0	8,0	2458	2,30%	23,8	24,1
0,48	10,5	10,0	2382	2,20%	23,8	23,7
0,45	8,0	8,5	2395	2,30%	23,9	23,6
0,42	8,0	7,5	2404	2,40%	23,9	23,8
0,39	10,0	10,0	2395	3,10%	24,2	23,9
0,36	7,0	6,0	2392	3,20%	23,3	23,4
0,33	8,0	7,5	2495	3,00%	23,6	23,7
0,30	8,0	7,0	2471	2,90%	23,4	23,6

6.3 Ensayo a compresión.

6.3.1 Ensayo a 7 días de edad.

En la Tabla N° 11 se presenta el resultado promedio del ensayo a compresión a 7 días de edad de probetas cúbicas y cilíndricas.

Tabla N° 11: Resultados ensayo a compresión a 7 días de edad.

A/C	Resistencia cúbica	Resistencia cilíndrica	Diferencia
	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)
0,98	116	112	5
0,83	177	167	10
0,77	245	220	25
0,71	273	242	31
0,59	371	346	25
0,58	372	336	36
0,54	416	386	30
0,51	560	526	34
0,48	594	563	31
0,45	581	563	18
0,42	627	618	9
0,39	549	492	58
0,36	678	655	23
0,33	607	592	15
0,30	855	799	56
Promedio			27

6.3.2 Ensayo a 28 días de edad.

En la Tabla N° 12 se presenta el resultado promedio del ensayo a compresión a 28 días de edad de probetas cúbicas y cilíndricas rectificadas.

Tabla N° 12: Resultados ensayo a compresión a 28 días de edad.

A/C	Resistencia cúbica	Resistencia cilíndrica	Diferencia
	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)
0,98	180	178	3
0,83	246	228	18
0,77	359	319	40
0,71	429	382	47
0,59	485	442	43
0,58	487	448	39
0,54	546	532	14
0,51	727	714	13
0,48	820	771	49
0,45	847	812	36
0,42	886	840	46
0,39	934	886	48
0,36	767	752	16
0,33	1049	961	88
0,30	1155	1063	92
Promedio			39

En la Tabla N° 13, se presentan los resultados del ensayo a compresión a 28 días de edad de probetas cilíndricas con preparación en sus caras con rectificado y refrentado.

Tabla N° 13: Resultados ensayo a compresión probetas cilíndricas.

A/C	Cilindro rectificado	Cilindro refrentado	Diferencia
	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)
0,98	178	185	7
0,83	228	240	12
0,77	319	325	6
0,71	382	393	10
0,59	442	449	7
0,58	448	494	46
0,54	532	561	29
0,51	714	762	48
0,48	771	796	25
0,45	778	811	33
0,42	811	826	15
0,39	850	901	51
0,36	752	781	29
0,33	921	944	23
0,30	1063	1094	31
Promedio			25

CAPITULO 7: ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos del ensayo a compresión de las probetas, mostrados en el capítulo 6, buscando dar respuesta a los objetivos planteados. Por esta razón, primero se realiza un análisis por edad y luego un análisis de los resultados combinados.

Para analizar de mejor manera los resultados obtenidos, se confeccionan los siguientes gráficos:

- Relación A/C versus resistencia. Muestra el comportamiento de la resistencia para ambos tipos de probetas (cilindro y cubo) para distintas relaciones A/C.
- Resistencia cúbica v/s resistencia cilíndrica. Con este gráfico se puede determinar la correlación que existe entre los resultados de ambos tipos de probeta.

7.1 Ensayo a compresión a 7 días de edad.

La resistencia del hormigón tiene como principal característica que se relaciona con la razón A/C de manera potencial (a mayor razón A/C menor resistencia y viceversa), en consecuencia, en la Tabla N° 11 se puede observar que las resistencias a la compresión obtenidas para las relaciones A/C 0,33 y 0,39 son anómalas, ya que dan valores menores a los obtenidos para la resistencia 0,36 y 0,42 respectivamente.

Esta anomalía se puede deber a las condiciones de curado inicial de las probetas, ya que como se menciona en el capítulo 5 en la sección 2, el curado inicial, hasta las 20 horas desde su confección, es a la intemperie. En particular, el día que se confeccionaron estas probetas, la temperatura ambiental durante las primeras 20 horas llegó a los 0°C, lo cual provoca un retardo en el fraguado del hormigón.

Dejando fuera del análisis los resultados obtenidos para las relaciones A/C 0,33 y 0,39, se confecciona el Gráfico N° 2, el cual muestra la curva potencial obtenida de todos los resultados y dos curvas adicionales, las cuales se confeccionan considerando que desde la relación A/C 0,51 se utiliza microsilíce (ver Tabla N° 3).

En el Gráfico N° 2, se puede observar que las curvas confeccionadas para hormigón con y sin microsilíce, poseen un coeficiente de correlación mayor al obtenido de confeccionar una curva con todos los datos, por lo que se puede aseverar que la confección de dos curvas representa de mejor manera los resultados obtenidos.

Cabe destacar que, independiente de la curva que se observe, siempre la curva de resistencias a compresión de las probetas cúbicas está sobre la de los cilindros, en promedio, 27 kg/cm^2 (tal como se muestra en la Tabla N° 11).

Por otra parte, al confeccionar el gráfico de resistencia cúbica v/s resistencia cilíndrica (Gráfico N° 3) no es necesario dejar fuera los resultados anómalos detectados al confeccionar el Gráfico N° 2, ya que la relación A/C no es una variable que influya en este gráfico.

Se puede observar en el Gráfico N° 3 que existe una recta que define a todos los puntos y que tiene un factor de correlación de 0,99, sin embargo, se pueden identificar dos tendencias, una antes de los 300 kg/cm^2 y otra después de este valor. Las ecuaciones que definen estas dos tendencias son rectas y también tienen factor de correlación 0,99.

En consecuencia, se puede establecer que la correlación existente entre el ensayo de probetas cúbicas y cilíndricas a 7 días de edad queda representada por las siguientes ecuaciones:

$$f_{cub} = 1,10 \cdot f_{cil} \quad (7) \quad \text{para } f_{cil} < 300 \text{ kg/cm}^2$$

$(R^2 = 0,99)$

$$f_{cub} = 0,96 \cdot f_{cil} + 47,45 \quad (8) \quad \text{para } f_{cil} > 300 \text{ kg/cm}^2$$

$(R^2 = 0,99)$

Donde:

f_{cil} : es la resistencia cilíndrica a compresión en kg/cm^2 .

f_{cub} : es la resistencia cúbica a compresión en kg/cm^2 .

Gráfico N° 2: Relación A/C versus resistencia: Probetas cúbicas y cilíndricas a 7 días de edad.

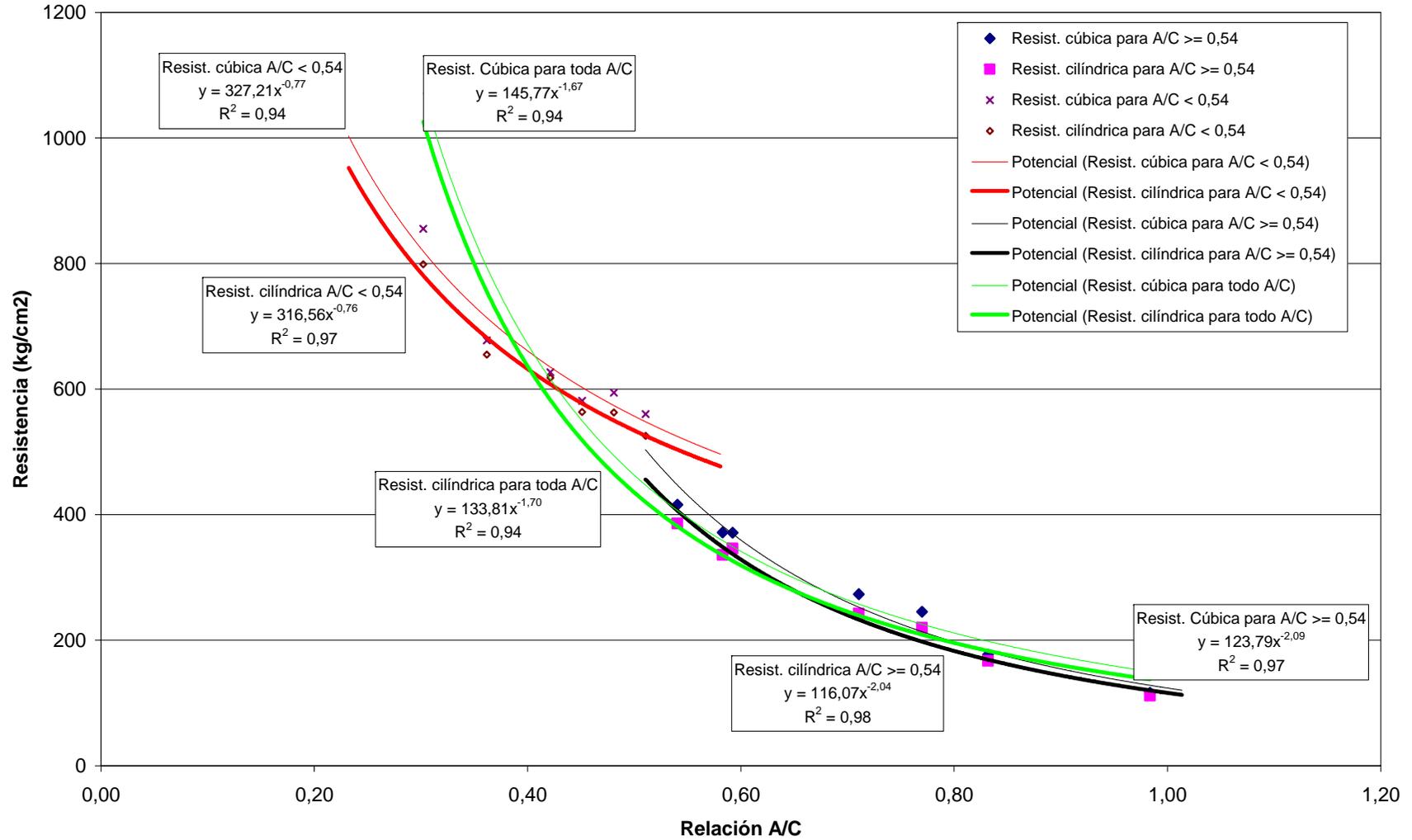
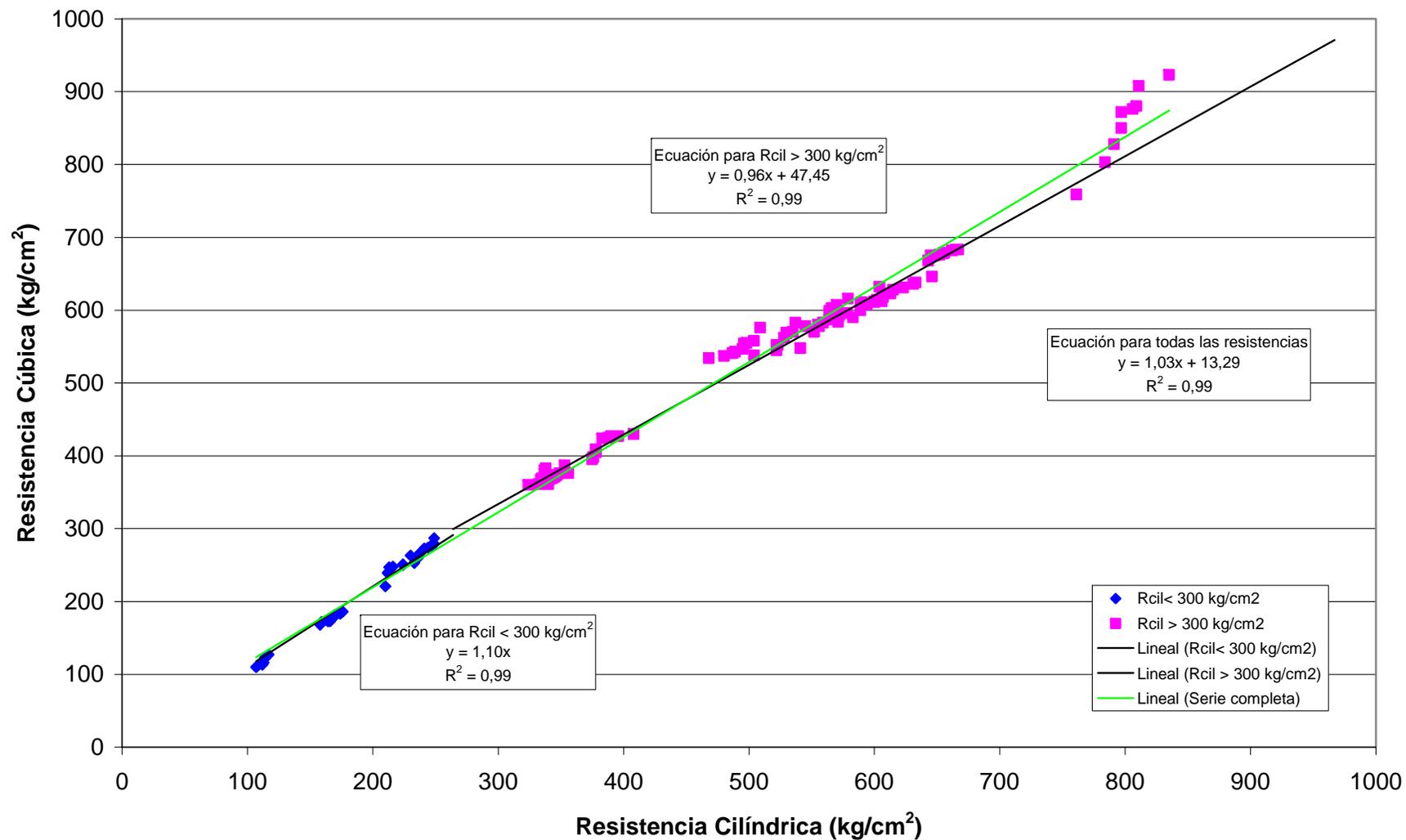


Gráfico N° 3: Resistencia cilíndrica v/s cúbica a 7 días de edad.



7.2 Ensayo a compresión a 28 días de edad.

Con el fin de establecer la existencia de anomalías en los resultados obtenidos a 28 días de edad, se utiliza como herramienta el crecimiento del hormigón, el cual se define como la razón entre la resistencia obtenida a 7 y 28 días de edad (R_7/R_{28}). En la Tabla N° 13, se presentan los crecimientos promedio obtenidos.

Tabla N° 13: Crecimiento del hormigón

A/C	Resistencia Cúbica		Crecimiento	Resistencia Cilíndrica		Crecimiento
	kg/cm ²			kg/cm ²		
	7 días	28 días		7 días	28 días	
0,98	116	180	0,65	112	178	0,63
0,83	177	246	0,72	167	228	0,73
0,77	245	359	0,68	220	319	0,69
0,71	273	429	0,64	242	382	0,63
0,59	371	485	0,77	346	442	0,78
0,58	372	487	0,76	336	448	0,75
0,54	416	546	0,76	386	532	0,72
0,51	560	727	0,77	526	714	0,74
0,48	594	820	0,72	563	771	0,73
0,45	581	847	0,69	563	812	0,69
0,42	627	886	0,71	618	840	0,74
0,39	549	934	0,59	492	886	0,55
0,36	678	767	0,88	655	752	0,87
0,33	607	1049	0,58	592	961	0,62
0,30	855	1155	0,74	799	1063	0,75
Promedio			0,71	Promedio		0,71

De la Tabla N° 13, se confirma la afirmación realizada en la sección anterior respecto al retardo a 7 días que presentó el hormigón con relación A/C 0,39 y 0,33. En efecto, los

crecimientos de ambas relaciones A/C están muy por debajo del promedio, con 0,59 y 0,58 respectivamente en las probetas cúbicas y 0,55 y 0,62 respectivamente en las probetas cilíndricas.

Además, se puede observar en la Tabla N° 13 que las probetas con relación A/C 0,36 presentaron un crecimiento anómalo ya que está por sobre el promedio con 0,88 para los cubos y 0,87 para los cilindros.

Dejando fuera el hormigón con relación A/C 0,36, en el Gráfico N° 4 se puede observar que el comportamiento de las probetas queda representado por dos ecuaciones, una para las relaciones A/C bajo 0,51 y otra sobre este valor.

Del mismo modo que con los resultados presentados a 7 días de edad, se vuelve a corroborar que las probetas cúbicas dan resultados mayores que los cilindros.

Al confeccionar el gráfico de resistencia cúbica v/s cilíndrica (Gráfico N° 5) se calcula la tendencia de todos los datos, la cual sigue una recta con coeficiente de correlación 0,99. Sin embargo, se pueden identificar tres tendencias, una hasta los 300 kg/cm², una entre 300 y 700 kg/cm² y otra sobre los 700 kg/cm². Las tendencias encontradas son lineales y tienen factores de correlación 0,97, 0,95 y 0,98 respectivamente.

Las ecuaciones que representan cada una de las tendencias están dadas por:

$$f_{cub} = 1,09 \cdot f_{cil} \quad (9) \quad \text{para } f_{cil} < 300 \text{ kg/cm}^2$$

$(R^2 = 0,97)$

$$f_{cub} = 0,87 \cdot f_{cil} + 93,06 \quad (10) \quad \text{para } 300 \text{ kg/cm}^2 < f_{cil} < 700 \text{ kg/cm}^2$$

$(R^2 = 0,95)$

$$f_{cub} = 1,22 \cdot f_{cil} - 135,62 \quad (11) \quad \text{para } f_{cil} > 700 \text{ kg/cm}^2$$

$(R^2 = 0,98)$

Donde:

f_{cil} : es la resistencia cilíndrica a compresión en kg/cm^2 .

f_{cub} : es la resistencia cúbica a compresión en kg/cm^2 .

Gráfico N° 4: Relación A/C versus resistencia: Probetas cúbicas y cilíndricas a 28 días de edad.

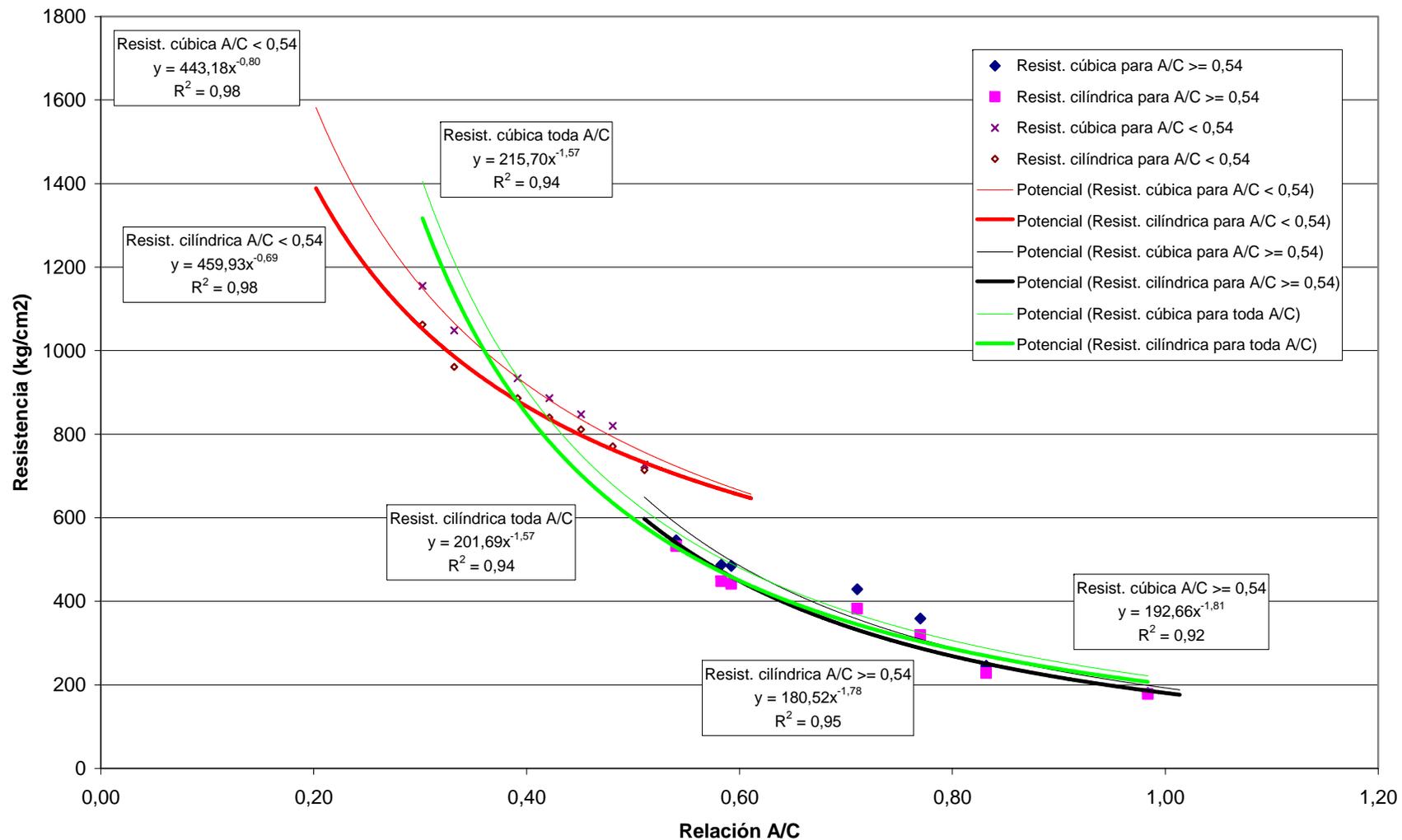
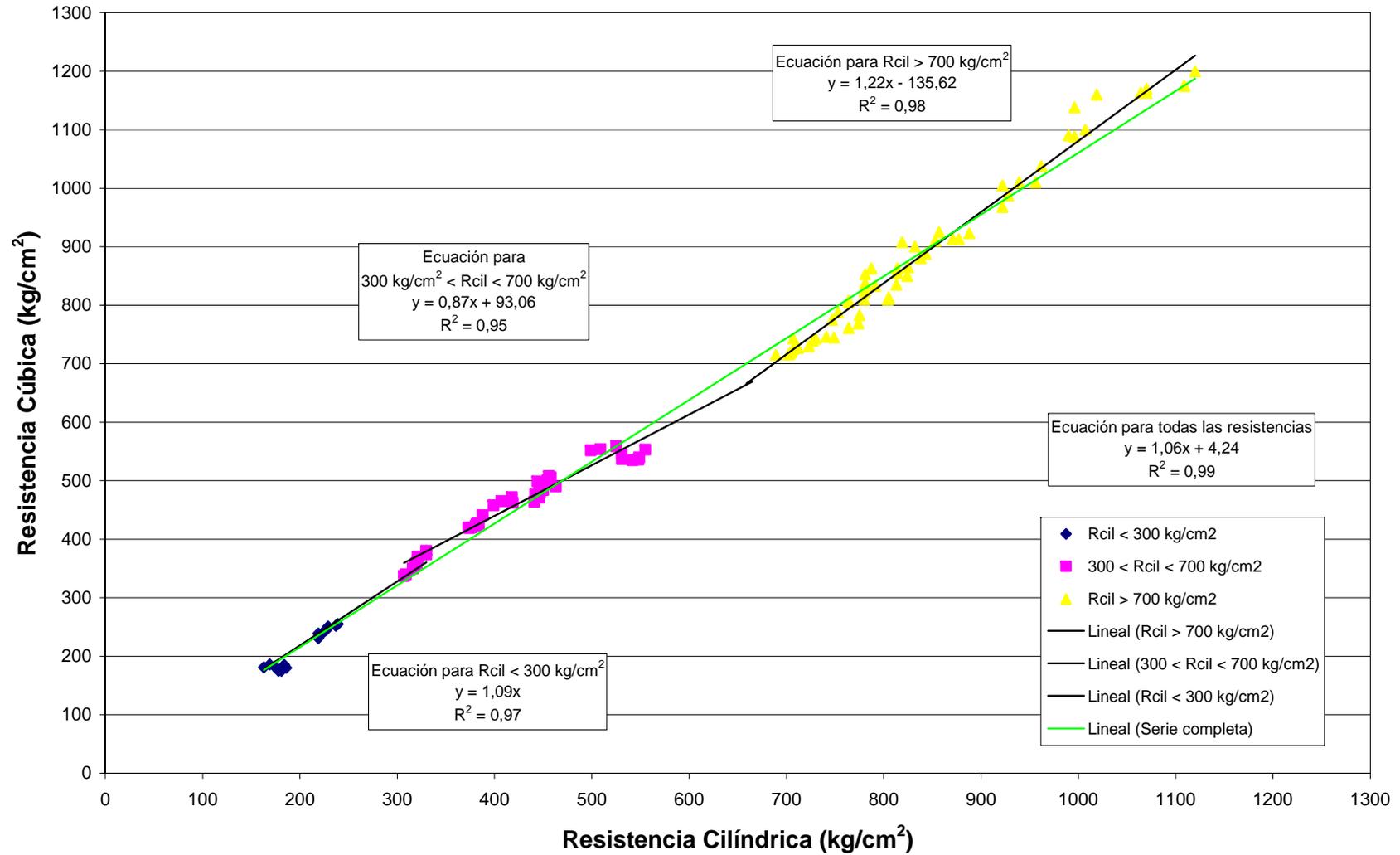


Gráfico N° 5: Resistencia cilíndrica v/s cúbica a 28 días de edad.

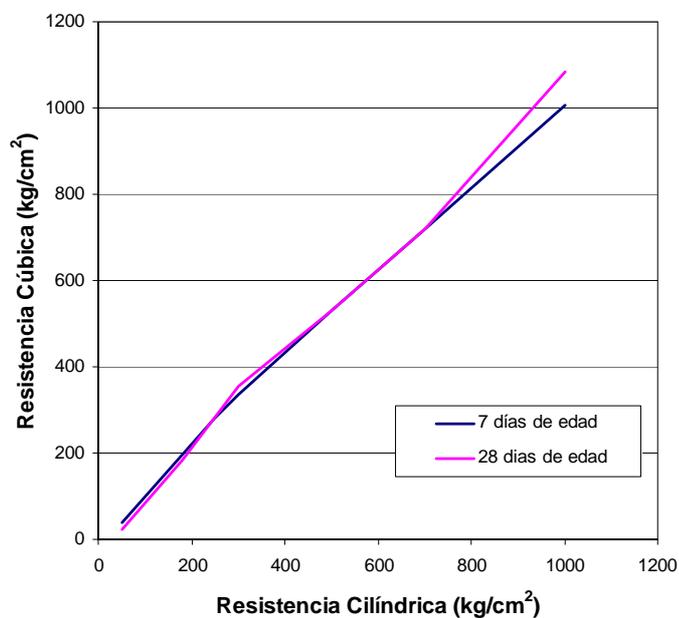


7.3 Comparación resultados a 7 y 28 días.

En esta sección se analiza el efecto de la edad de ensayo sobre la correlación de la resistencia de probetas cilíndricas y cúbicas.

En el Gráfico N° 6 se presentan las curvas encontradas en ambas edades, concluyéndose que el comportamiento es prácticamente igual salvo sobre los 700 kg/cm², valor para el que sólo existe un dato para 7 días de edad.

Gráfico N° 6: Curvas a 7 y 28 días.



En consecuencia, se puede afirmar que la correlación entre las resistencia del ensayo a compresión de probetas cúbicas y cilíndricas no depende de la edad de ensayo.

Del Gráfico N° 7 se puede observar el comportamiento potencial de las resistencias a 7 y 28 días para las distintas relaciones A/C, permitiendo concluir que las probetas cúbicas dan resultados mayores a las probetas cilíndricas independiente de la relación A/C y de la edad de ensayo.

Por otra parte, si se confecciona un gráfico con los datos agregados de 7 y 28 días de edad (ver Gráfico N° 8) se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$f_{cub} = 1,10 \cdot f_{cil} \quad (12) \quad \text{para } f_{cil} < 300 \text{ kg/cm}^2$$

(R² = 0,98)

$$f_{cub} = 0,93 \cdot f_{cil} + 65,81 \quad (13) \quad \text{para } 300 \text{ kg/cm}^2 < f_{cil} < 700 \text{ kg/cm}^2$$

(R² = 0,98)

$$f_{cub} = 1,21 \cdot f_{cil} - 129,50 \quad (14) \quad \text{para } f_{cil} > 700 \text{ kg/cm}^2$$

(R² = 0,97)

Donde:

f_{cil} : es la resistencia cilíndrica a compresión en kg/cm².

f_{cub} : es la resistencia cúbica a compresión en kg/cm².

Al comparar estas rectas con las conversiones propuestas en los antecedentes (ver Gráfico N° 8), se puede observar que la curva encontrada es más conservadora que la las propuestas en los Antecedentes, salvo la experiencia IDIEM.

Las diferencias con las conversiones propuestas se deben a que ellas consideran una gran variedad de tipos de hormigón, mientras que el presente trabajo, considera sólo el hormigón confeccionado con los materiales descritos en el capítulo 5.

Gráfico N° 7: Relación A/C versus resistencia: Probetas cúbicas y cilíndricas.

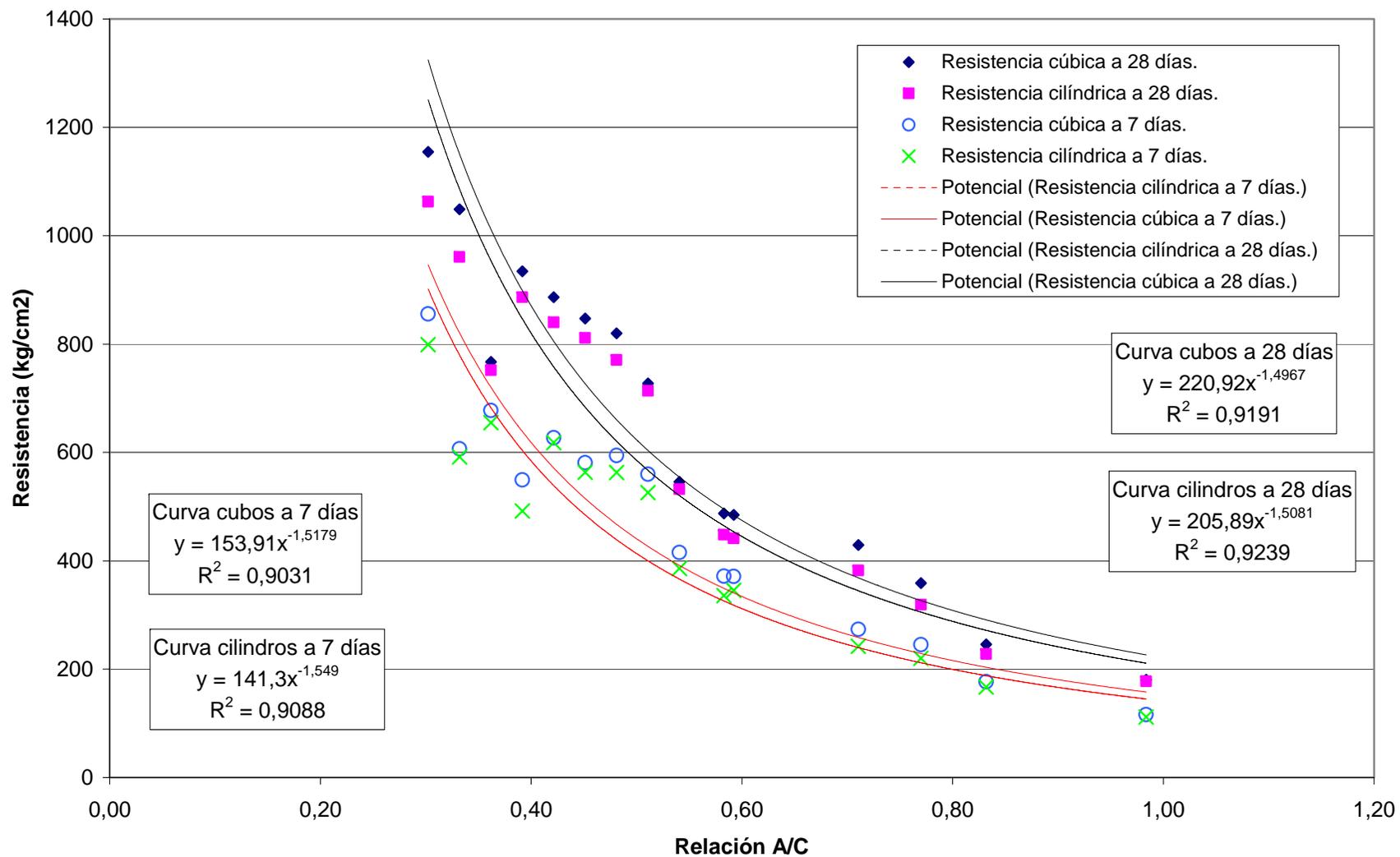


Gráfico N° 8: Resistencia cilíndrica v/s cúbica (datos agregados)

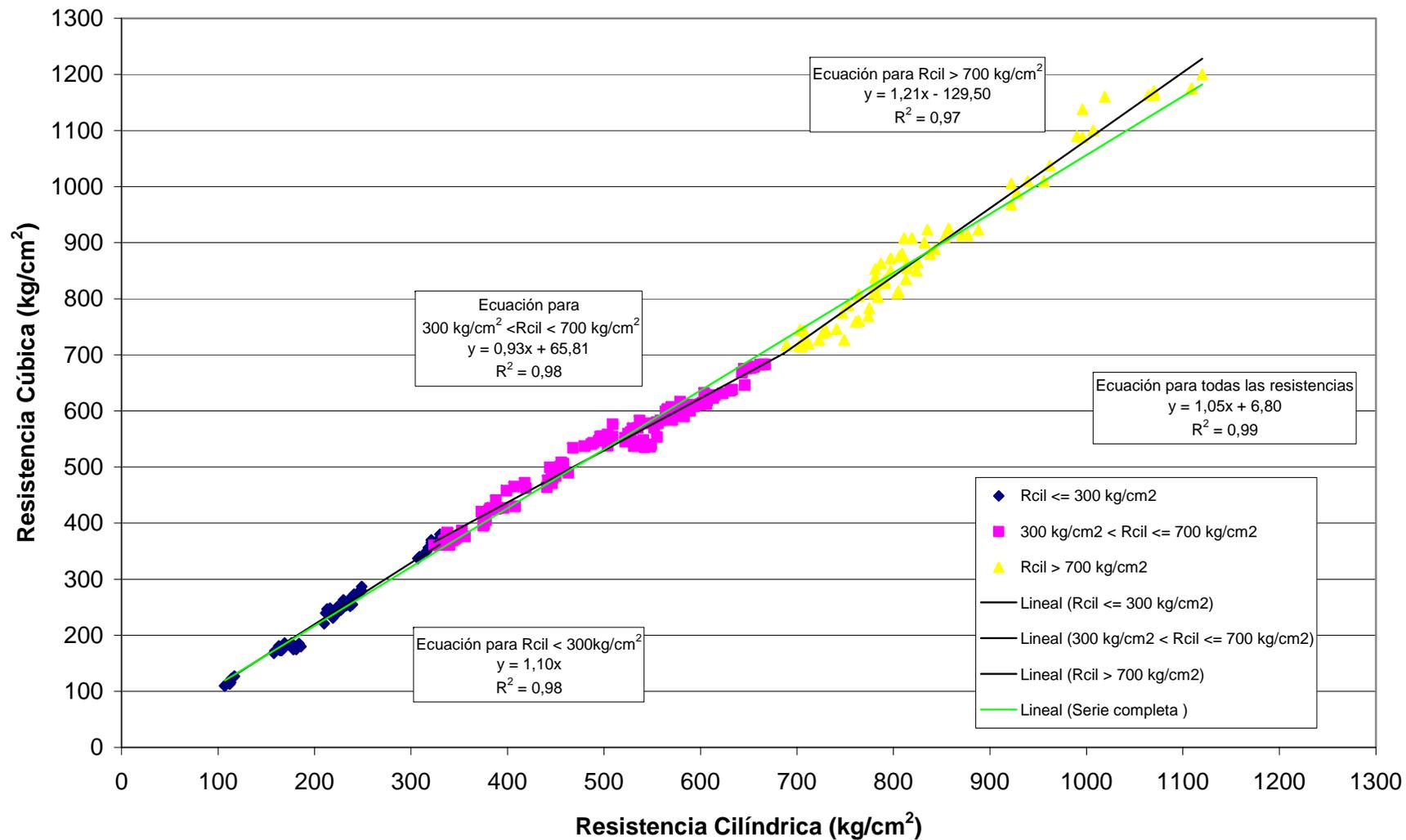
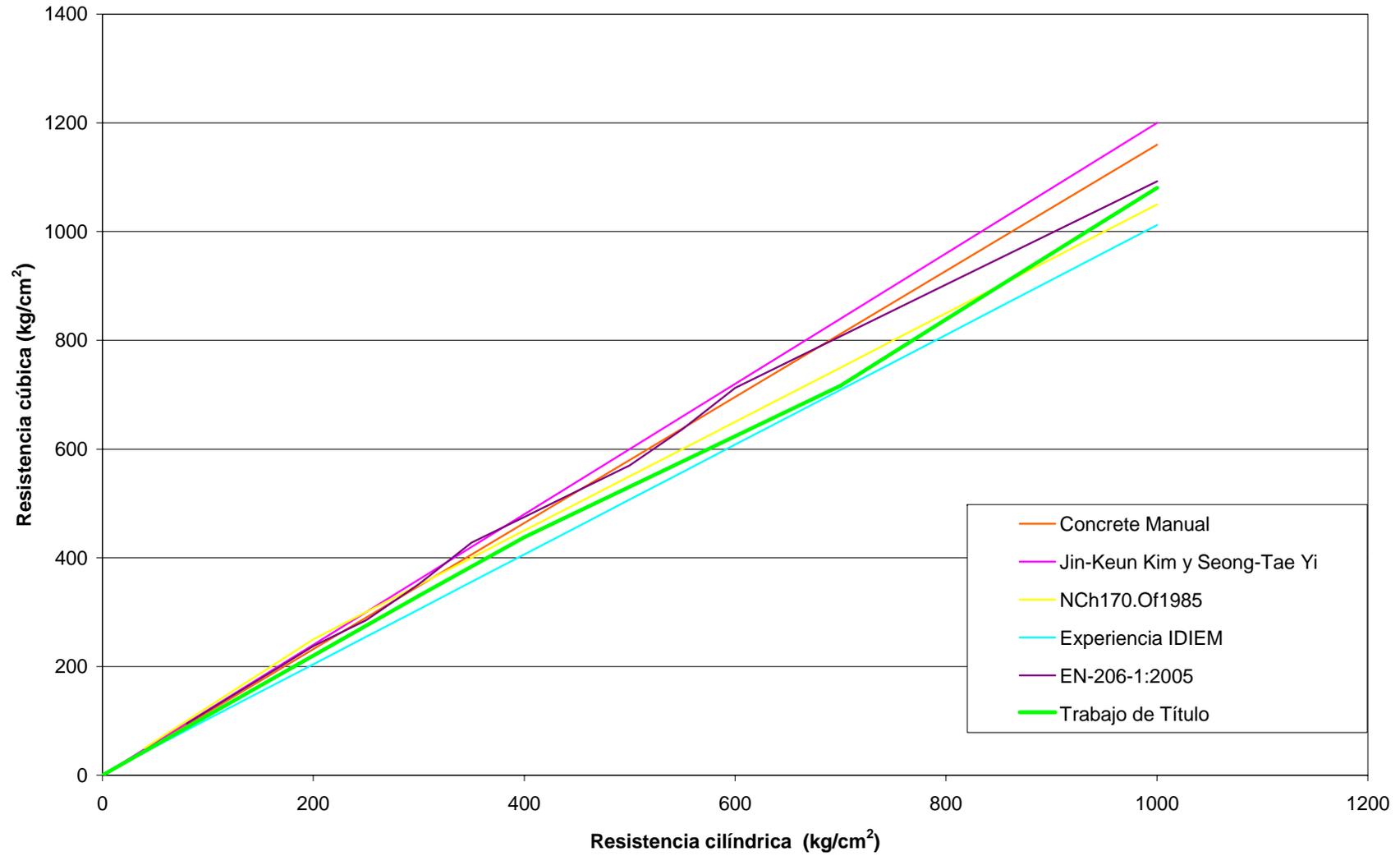


Gráfico N° 9: Comparación con conversiones propuestas.



7.4 Ensayo a compresión de cilindros rectificadas y refrentados.

Al igual que el análisis realizado para las distintas edades, en el caso del tipo de preparación de las caras de los cilindros también se confeccionan dos gráficos.

El Gráfico N° 10, muestra que el comportamiento de cilindros rectificadas y refrentados es potencial al igual que los resultados de cubos y cilindros. Además, se puede observar que la curva de los cilindros refrentados está siempre por sobre la de los cilindros rectificadas y, en consecuencia, se puede afirmar que los cilindros refrentados dan resistencias mayores a los rectificadas.

Por otra parte, en el Gráfico N° 11, se muestra la correlación entre ambos tipo de preparación de las caras de los cilindros. La correlación obtenida es lineal y queda expresada por la ecuación (15).

$$f_{rect} = 0,97 \cdot f_{refr} - 4,30 \quad (R^2 = 1,00) \quad (15)$$

Donde:

f_{rect} : es la resistencia a compresión de cilindros rectificadas en kg/cm².

f_{refr} : es la resistencia a compresión de cilindros refrentados en kg/cm².

Cabe destacar que los resultados esperados de estos ensayos eran inversos, es decir, que los cilindros rectificadas debían presentar resistencias mayores que los refrentados, ya que se esperaba que debido a la ruptura de la capa de refrentado se presentara una distribución de esfuerzos anómala.

La razón de esto puede estar relacionada con la gran calidad del rectificadas que se realiza, lo cual provoca que el tipo de falla que se produce ya no sea en forma de reloj de arena, sino que, debido a que el roce que existe entre la placa de carga y la probeta es mínimo, se produzca tracción en todo el cilindro y en consecuencia resistencias menores.

Gráfico Nº 10: Resistencia cilíndrica refrentada y rectificada.

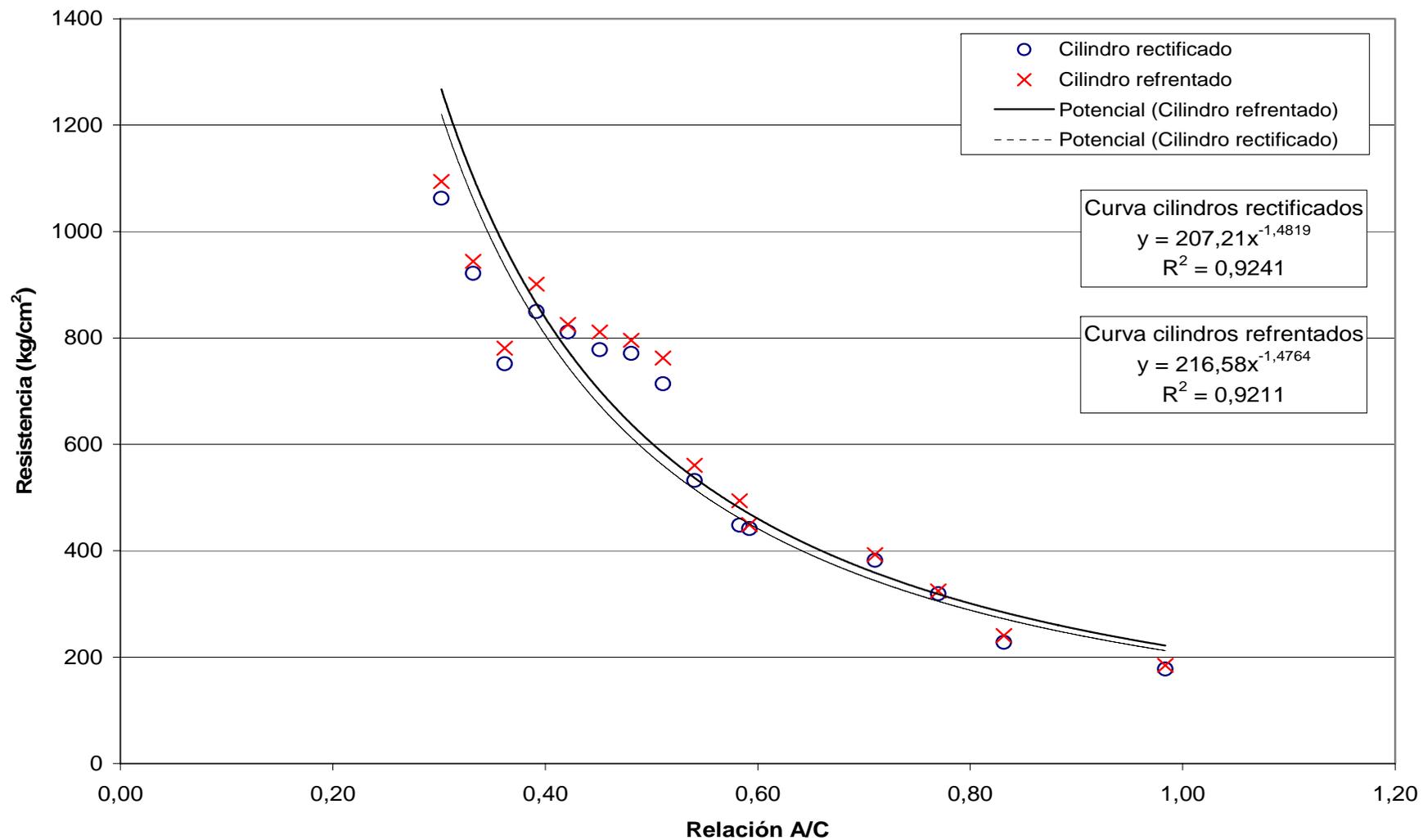
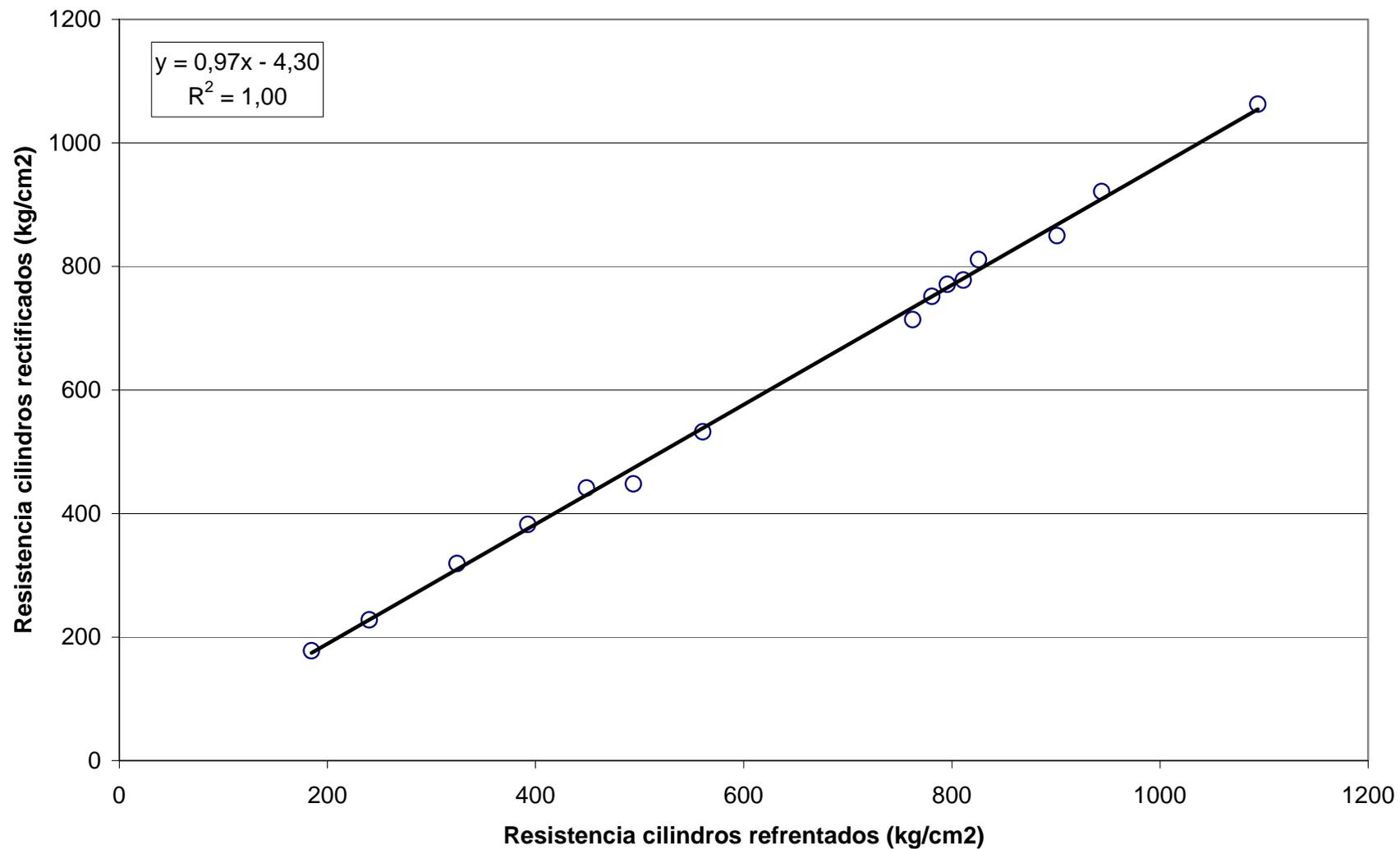


Gráfico N° 11: Resistencia cilíndrica refrentada v/s rectificada.



CAPITULO 8: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

i. Correlaciones resistencia cúbica – resistencia cilíndrica.

Existen correlaciones lineales entre los resultados del ensayo a compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. Estas correlaciones son válidas en el intervalo de resistencias ensayado y para los materiales descritos en el capítulo 5.

a) Edad 7 días:

$$f_{cub} = 1,10 \cdot f_{cil} , (R^2 = 0,99) , \quad \text{para } f_{cil} < 300 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{cub} = 0,96 \cdot f_{cil} + 47,45 , (R^2 = 0,99) \quad \text{para } f_{cil} > 300 \text{ kg/cm}^2$$

b) Edad 28 días:

$$f_{cub} = 1,09 \cdot f_{cil} , (R^2 = 0,97) \quad \text{para } f_{cil} < 300 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{cub} = 0,87 \cdot f_{cil} + 93,06 , (R^2 = 0,95) \quad \text{para } 300 \text{ kg/cm}^2 < f_{cil} < 700 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{cub} = 1,22 \cdot f_{cil} - 135,62 , (R^2 = 0,99) \quad \text{para } f_{cil} > 700 \text{ kg/cm}^2$$

Donde:

f_{cil} : es la resistencia cilíndrica a compresión en kg/cm².

f_{cub} : es la resistencia cúbica a compresión en kg/cm².

c) La similitud entre ambas correlaciones permite establecer una correlación única independiente de la edad del hormigón, que se puede expresar como:

$$f_{cub} = 1,10 \cdot f_{cil} , (R^2 = 0,98) \quad \text{para } f_{cil} < 300 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{cub} = 0,93 \cdot f_{cil} + 65,81 , (R^2 = 0,98) \quad \text{para } 300 \text{ kg/cm}^2 < f_{cil} < 700 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{cub} = 1,21 \cdot f_{cil} - 129,50 , (R^2 = 0,97) \quad \text{para } f_{cil} > 700 \text{ kg/cm}^2$$

Donde:

f_{cil} : es la resistencia cilíndrica a compresión en kg/cm^2 .

f_{cub} : es la resistencia cúbica a compresión en kg/cm^2 .

- ii. La norma NCh170.Of1985 entrega una correlación basada en dos ecuaciones, una hasta los 250 kg/cm^2 y otra desde este valor hasta 650 kg/cm^2 , luego de este valor no entrega correlación, debido que en los años 80 no existían hormigones de resistencias mayores a 650 kg/cm^2 . Actualmente, la correlación utilizada para valores sobre los señalados en la norma se obtiene de extrapolar la ecuación presentada en ella (se suman 50 kg/cm^2 a la probeta cilíndrica para convertir a cúbica). Con los resultados obtenidos en este trabajo se puede establecer que la extrapolación utilizada no es correcta, ya que independiente de los valores encontrados, el comportamiento de la correlación varía sobre los 700 kg/cm^2 , en efecto la correlación encontrada cuenta de tres ecuaciones. Esta forma de la correlación se asemeja al presentado por la norma europea EN-206-1 que presenta distintas ecuaciones para rangos de resistencias.
- iii. Existe una correlación lineal entre los resultados del ensayo a compresión de probetas cilíndricas refrentadas (capping) y los de las rectificadas. La ecuación que representa esta correlación es la siguiente:

$$f_{rect} = 0,97 \cdot f_{refr} - 4,30, (R^2 = 1,00)$$

Donde:

f_{rect} : es la resistencia a compresión de cilindros rectificadas en kg/cm².

f_{refr} : es la resistencia a compresión de cilindros refrentados en kg/cm².

- iv. Un resultado muy interesante es el obtenido a partir de la comparación de valores de resistencia obtenidos con probetas refrentadas versus los obtenidos con probetas rectificadas ya que, al contrario de lo que se esperaba, las resistencias de las probetas refrentadas resultaron siempre mayores que las probetas rectificadas. En consecuencia, se propone realizar a futuro un estudio sobre la influencia de los tipos de materiales utilizados para refrentado de probetas y de los defectos que corrientemente se producen al confeccionar el refrentado, en la resistencia a compresión de las probetas.
- v. Es importante mencionar que los coeficientes de correlación de las rectas encontradas para los datos agregados son 0,98, 0,98 y 0,97, lo cual implica que la correlación encontrada representa en 98% los resultados obtenidos.
- vi. Cabe destacar que del total de 540 ensayos realizados para establecer la correlación entre cubo y cilindros, el coeficiente de variación para cubos es 3,11%, con un máximo de 6,05% y para los cilindros fue 2,72%, con un máximo de 4,40%.
- vii. Respecto al fenómeno ocurrido en la curva de resistencias versus relación A/C, se debe considerar que la microsílíce es un cementante, por lo que era esperable que la curva subiera al utilizarlo. Otra manera de ajustar la curva podría ser utilizar la relación agua-cementante, lo cual implica sumar al cemento la microsílíce. En este trabajo no se realiza, ya que el objetivo del gráfico es mostrar que la curva de resistencias de las probetas cúbicas esta por sobre la de las cilíndricas, lo cual se logra.

viii. Además, se sugiere mejorar las siguientes condiciones de la metodología:

- Curado inicial. El curado inicial (primeras 20 horas hasta el desmolde) se realizó a la intemperie con cubierta plástica. Se recomienda utilizar curado inicial bajo agua en condiciones de laboratorio, ya que con este curado se podrá disminuir las dispersiones entre probetas.
- Máquina de ensayo de 500 ton. La máquina de ensayo fue fabricada en la década de 1940, por lo que la tecnología utilizada para la regulación de la velocidad de ensayo manual, la capacidad de centrado de la placa inferior es deficiente. En ocasiones se visualizó falla por tracción en las probetas debido a la incapacidad de centrarlas en la placa y en consecuencia arroja mucha dispersión en los resultados. Se recomienda utilizar una máquina que regule la velocidad de ensayo automáticamente.

CAPITULO 9: BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- Jin-Keun Kim y Seong-Tae Yi, "Application of size effect to compressive strength of concrete members", Publicación Sadhana Vol. 27, Part 4, August 2002, pp. 467–484.
- Arboleda, Juan, "Resistencia a compresión del hormigón: Influencia del tipo de probeta y de las condiciones de curado", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 2004.
- Piñeiro, Moisés. "Resistencia a la compresión del hormigón. Influencia de los defectos de la probeta cúbica."; Revista del IDIEM, Volumen 8, 1969.
- Bucarey, Arnoldo; Liberona, Mario; Pérez, Alejandro. "Control de conformidad del hormigón según norma europea EN 206-1:2000"; XIV Jornadas Chilenas del Hormigón, 2003.
- Arcos, Carlos; "Estudio experimental de la correlación entre resistencias a compresión del hormigón en probetas cúbicas de 15 y 20 cm de arista"; Revista del IDIEM, Volumen 19, mayo 1980.
- Norma europea EN 206-1:2005. Concrete – Part 1 – Specification, performance, production and conformity.
- Norma chilena. NCh170.Of1985 Hormigón – Requisitos generales
- Norma chilena. NCh1018.Of1977 Hormigón – Preparación de mezclas de prueba en laboratorio.
- Norma chilena. NCh1017.Of1975 Hormigón – Confección y curado en obra de

probetas para ensayos de compresión y tracción.

- Norma chilena. NCh1037.Of1977. Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.
- Norma chilena. NCh1019.Of1974. Hormigón – Determinación de la docilidad. Método del asentamiento del cono de Abrams.
- U.S. Department of the Interior, “Concrete Manual”, Eighth Edition, 1975.

ANEXOS

Anexo 1: Resultados a 7 días ensayo a compresión.

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,98	448	110	116	192,1	107	112
2		443	110		188,8	107	
3		454	113		193,1	109	
4		455	113		197,4	112	
5		460	114		197,8	112	
6		462	116		197,9	113	
7		491	122		199,8	114	
8		497	123		200	114	
9		517	127		205,1	117	
1	0,83	678	168	177	275,1	158	167
2		692	172		279,6	159	
3		696	173		288,5	164	
4		695	173		288,4	165	
5		706	173		294,7	166	
6		720	177		294,2	168	
7		722	181		301,1	169	
8		737	182		298,8	170	
9		733	183		305,9	174	
10		745	186		307	176	

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,77	888	221	245	369	210	220
2		958	239		372	212	
3		961	240		374	212	
4		990	247		381	213	
5		1004	248		382	216	
6		992	250		394	224	
7		1004	251		395	224	
8		1014	253		415	233	
9		1044	260		414	236	
1	0,71	1058	263	273	399	230	242
2		1065	264		417	236	
3		1077	267		415	238	
4		1100	273		427	241	
5		1109	274		423	244	
6		1107	276		434	247	
7		1132	278		428	247	
8		1127	279		440	249	
9		1149	287		440	249	
1	0,59	1447	361	371	596	340	346
2		1483	368		599	341	
3		1501	369		602	343	
4		1497	371		610	345	
5		1490	372		598	345	
6		1509	373		612	346	
7		1513	374		605	347	
8		1518	376		617	349	
9		1509	376		625	356	

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,58	1449	360	372	573	324	336
2		1443	361		582	332	
3		1463	363		595	334	
4		1479	367		587	334	
5		1490	369		592	335	
6		1506	376		596	337	
7		1519	380		588	337	
8		1530	383		594	338	
9		1539	387		616	353	
1	0,54	1603	395	416	658	375	386
2		1613	398		674	376	
3		1639	405		677	378	
4		1659	409		664	378	
5		1701	424		676	383	
6		1714	425		686	388	
7		1722	427		684	390	
8		1708	427		704	396	
9		1726	430		717	408	
1	0,51	2183	538	560	884	504	526
2		2206	545		928	522	
3		2218	552		917	522	
4		2242	552		924	523	
5		2278	562		933	528	
6		2307	568		937	530	
7		2304	569		943	530	
8		2301	570		940	535	
9		2354	583		937	537	

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,48	2348	578	594	963	545	563
2		2350	580		1008	555	
3		2373	583		988	559	
4		2364	587		1004	564	
5		2412	596		1010	564	
6		2433	599		1004	564	
7		2423	603		1000	566	
8		2470	607		1007	570	
9		2506	616		1016	579	
1	0,45	2223	548	581	962	541	563
2		2304	570		969	552	
3		2353	578		976	556	
4		2343	583		969	559	
5		2359	584		1003	571	
6		2362	589		1016	571	
7		2394	590		995	571	
8		2396	593		998	572	
9		2389	596		1015	578	
1	0,42	2492	611	627	1042	590	618
2		2440	612		1071	606	
3		2483	618		1066	607	
4		2503	623		1069	613	
5		2506	628		1079	615	
6		2542	631		1108	623	
7		2544	636		1108	631	
8		2544	638		1111	633	
9		2637	646		1126	646	

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,39	2180	534	549	850	468	492
2		2190	537		860	480	
3		2160	541		860	487	
4		2190	543		870	489	
5		2200	547		880	495	
6		2210	554		870	496	
7		2230	555		880	498	
8		2230	558		890	504	
9		2300	576		900	509	
1	0,36	2680	668	678	1144	643	655
2		2700	675		1140	645	
3		2712	675		1145	648	
4		2712	676		1130	652	
5		2720	678		1157	655	
6		2744	679		1160	656	
7		2736	682		1155	662	
8		2740	683		1168	665	
9		2732	683		1163	667	
1	0,33	2390	587	607	1000	566	592
2		2400	590		1030	583	
3		2430	600		1040	589	
4		2450	608		1020	589	
5		2470	608		1050	594	
6		2480	611		1040	600	
7		2490	612		1040	600	
8		2470	614		1050	602	
9		2560	632		1060	604	

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,30	3080	759	855	1344	761	799
2		3260	803		1377	784	
3		3320	828		1397	791	
4		3400	850		1409	797	
5		3530	872		1409	797	
6		3530	876		1424	806	
7		3530	880		1429	809	
8		3660	908		1442	811	
9		3740	923		1447	835	

Anexo 2: Resultados a 28 días ensayo a compresión.

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,98	730	181	180	290	163	178
2		713	175		314	178	
3		705	175		317	181	
4		717	178		321	182	
5		718	180		319	182	
6		718	180		330	186	
7		731	182		310	174	
8		744	185		320	184	
9		753	186		301	169	

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,83	939	231	246	385	219	228
2		960	239		389	219	
3		972	242		398	225	
4		978	245		401	227	
5		995	247		406	228	
6		995	248		397	228	
7		1005	251		407	229	
8		1009	252		416	237	
9		1026	255		419	239	
1	0,77	1369	337	359	539	307	319
2		1361	340		538	309	
3		1411	350		551	316	
4		1432	356		559	318	
5		1442	359		561	320	
6		1464	365		563	321	
7		1502	370		564	321	
8		1493	374		579	330	
9		1524	380		584	330	
1	0,71	1684	419	429	652	374	382
2		1681	420		641	373	
3		1690	420		651	376	
4		1708	423		673	381	
5		1723	426		662	382	
6		1707	426		659	383	
7		1720	427		665	384	
8		1764	441		672	388	
9		1830	458		687	399	

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,59	1878	465	485	714	407	442
2		1927	472		754	418	
3		1915	476		781	442	
4		1941	480		778	446	
5		1954	481		795	447	
6		1993	495		780	450	
7		1995	496		805	453	
8		2007	496		804	455	
9		2040	502		812	456	
1	0,58	1854	462	487	740	419	448
2		1871	464		780	441	
3		1900	471		789	446	
4		1951	484		800	450	
5		1956	490		802	463	
6		2002	499		796	444	
7		2015	501		798	455	
8		2017	506		804	458	
9		2039	508		811	456	
1	0,54	2230	552	546	888	499	532
2		2240	559		916	525	
3		2169	537		939	531	
4		2190	545		939	531	
5		2165	535		958	542	
6		2169	536		968	548	
7		2165	540		964	549	
8		2213	553		974	555	
9		2231	554		900	509	

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,51	2926	730	727	1225	707	714
2		2937	725		1255	710	
3		2965	727		1269	723	
4		2984	739		1276	727	
5		2956	745		1234	703	
6		2910	720		1250	712	
7		2902	727		1297	749	
8		2897	717		1210	689	
9		2889	715		1230	705	
1	0,48	3100	775	820	1320	747	771
2		3150	788		1330	753	
3		3220	805		1350	764	
4		3230	808		1350	764	
5		3290	823		1379	780	
6		3300	825		1380	781	
7		3350	838		1380	781	
8		3410	853		1380	781	
9		3450	863		1390	787	
1	0,45	3240	810	847	1420	804	812
2		3250	813		1423	805	
3		3340	835		1437	813	
4		3420	855		1438	814	
5		3450	863		1439	814	
6		3630	908		1447	819	
1	0,42	3400	850	886	1457	824	840
2		3460	865		1458	825	
3		3520	880		1481	838	
4		3550	888		1490	843	
5		3640	910		1508	853	
6		3700	925		1515	857	

Ítem	A/C	Probeta Cúbica			Probeta Cilíndrica		
		Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,39	3600	900	934	1470	832	886
2		3650	913		1540	871	
3		3650	913		1550	877	
4		3690	923		1570	888	
5		3870	968		1630	922	
6		3950	988		1640	928	
1	0,36	2870	716	767	1240	702	752
2		2980	743		1250	707	
3		3000	743		1290	730	
4		2990	746		1300	741	
5		3050	761		1360	764	
6		3090	769		1350	774	
7		3140	783		1370	775	
8		3240	810		1360	780	
9		3330	833		1370	791	
1	0,33	4020	1005	1049	1630	922	886
2		4040	1010		1660	939	
3		4040	1010		1690	956	
4		4150	1038		1700	962	
5		4360	1090		1750	990	
6		4550	1138		1760	996	
1	0,30	4350	1088	1155	1760	996	1063
2		4400	1100		1780	1007	
3		4640	1160		1800	1019	
4		4650	1163		1880	1064	
5		4650	1163		1890	1070	
6		4680	1170		1890	1070	
7		4700	1175		1960	1109	
8		4700	1175		1960	1109	
9		4800	1200		1980	1120	

Anexo 3: Resultado ensayo a compresión probetas cilíndricas refrentadas.

Ítem	A/C	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,98	324	182	185
2		329	186	
3		330	186	
1	0,83	423	241	240
2		417	236	
3		429	244	
1	0,77	575	325	325
2		571	325	
3		568	324	
1	0,71	687	394	393
2		682	394	
3		676	390	
1	0,59	794	446	449
2		792	448	
3		805	453	
1	0,58	868	488	494
2		902	507	
3		873	487	
1	0,54	985	554	561
2		987	559	
3		1005	569	
1	0,51	1346	767	762
2		1310	756	
3		1323	764	
1	0,48	1391	787	796
2		1427	808	
3		1409	792	
1	0,45	1412	804	811
2		1423	811	
3		1416	818	

Ítem	A/C	Carga (kN)	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio
1	0,42	1471	827	826
2		1454	823	
3		1462	827	
1	0,39	1596	903	901
2		1559	882	
3		1633	918	
1	0,36	1410	798	781
2		1370	775	
3		1360	770	
1	0,33	1646	931	944
2		1691	957	
3		1668	944	
1	0,30	1869	1058	1094
2		1947	1109	
3		1971	1115	