

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA  
LABORATORIO DE ESTRUCTURAS

**ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA  
DEL HORMIGÓN MEDIANTE  
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Por

*Ing. Civil Domingo Luis Amín*

*Tesis presentada como requerimiento para acceder al grado académico de Magister en  
Ingeniería Estructural.*

Dirigida por:

Ing. José Rodolfo Barlek

San Miguel de Tucumán, 2001

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo llevó muchas horas de lectura, investigación, estudio, planeamiento, redacción, revisión, corrección e impresión, y también llevó muchas horas de dedicación al laboratorio para la elaboración de los hormigones, puesta a punto de los equipos y la realización de los ensayos, además de las arduas determinaciones realizadas en obras. Y para ello conté con la invaluable colaboración brindada por los Sres. Jorge Ávila, Armando Falcón y Juan Carlos Serrizuela, personal del Laboratorio de Ensayo de Materiales.

No puedo dejar de destacar el apoyo brindado por el personal docente y no docente del Laboratorio de Estructuras en la busca de bibliografía, traducciones, etc. y en el “*apoyo moral*”, cuando las largas horas de estudio me hacían dudar sobre la continuación en los cursos.

Al Ingeniero José Rodolfo Barlek, mi *Director de Tesis*, quien, con la propuesta del tema, me permitió estudiar, investigar y trabajar más sobre los Ensayos No Destructivos, algo que despertó mi interés hace muchos años, cuando conocí sus posibilidades de aplicación.

También quiero agradecer al Director, Dr. Rodolfo Danesi, y a los docentes del VI Magister, que perdiendo horas de descanso, se prestaron a las consultas durante el período de clases y el tiempo que llevó la realización de esta Tesis.

Llegue mi especial agradecimiento al Ingeniero Ángel Di Maio, especialista en los Ensayos No Destructivos, que me brindó sus conocimientos sobre el tema y el apoyo para la búsqueda de bibliografía, publicaciones, etc., sin contar, además, el tiempo que le dedicó a la lectura, revisión y corrección, tanto de los avances como del trabajo final.

A la Ingeniera Nélide del V. Castría, Directora del Laboratorio de Ensayo de Materiales, que me alentara siempre a la realización de los cursos y a la dedicación a la Tesis, brindándome en todo momento su experiencia y apoyo.

A mis compañeros de tareas: los Ingenieros Silvia Palazzi y Daniel Anaya, con quienes en largas discusiones sobre el tema, aportaron su grano de arena para la elaboración de este trabajo.

A mis compañeros del VI Magister, quienes hicieron más amenas las horas de estudio, y en los que estuvo siempre presente el espíritu de camaradería y colaboración.

Pero a quienes debo, fundamentalmente, la posibilidad de la realización de los cursos y de esta Tesis, es a mi esposa Teresita y a mis hijas Lourdes, Sofía y Lucía quienes llevando la peor parte de estos más de dos años, perdieron horas de vida en familia y escucharon obligatoriamente todo el día acerca de un tema que no conocían y que no tenía por qué gustarles, debiendo adecuarse a mis prioridades y exigencias de distintos momentos del trabajo.

A todos ellos mi más sincero agradecimiento, reconociendo que esta realización es fruto de la siembra de mis padres, Carlos y Luisa Amín, de cuyo ejemplo bebí el apego y la dedicación por la carrera.

# **RESUMEN**

## **ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Ing. Civil Domingo Luis Amín

La evaluación de estructuras existentes, ya sea para repararlas, reforzarlas y/o reciclarlas para nuevos usos, requiere del conocimiento tanto de los tipos de materiales constitutivos de las mismas, como así también de parámetros que permitan caracterizar el estado actual de tales materiales.

Tomando en consideración que son las estructuras de hormigón armado las que con mayor frecuencia son objeto de las mencionadas modificaciones, resulta de particular interés en este campo, la estimación de la resistencia del hormigón de dichas estructuras.

Una forma económica y rápida de hacerlo es mediante el uso de los Ensayos No Destructivos (END), entre los cuales se destacan los métodos esclerométricos, ultrasónicos y de extracción de insertos, los que han adquirido amplia difusión, al punto que su uso se encuentra normalizado en algunos de los códigos de construcción más avanzados.

En este trabajo se determinan expresiones que, con los resultados de los ensayos antes mencionados, permiten estimar la resistencia de hormigones elaborados con materiales y tecnologías usuales en la región.

Con el propósito de obtener tales expresiones, se llevó a cabo un amplio programa experimental, en el cual se elaboraron cuatro tipos de hormigón con distintas relaciones agua/cemento. Con los mismos, se procedió a llenar 146 probetas normalizadas y 11 pequeñas placas cuadradas, las cuales fueron ensayadas a 7, 28, 60 y 120 días.

En las probetas se realizaron mediciones de ultrasonido y esclerometría antes de ser ensayadas a rotura por compresión axial. Por otro lado, sobre las placas, se efectuaron determinaciones de tiempo de pasaje del pulso ultrasónico, esclerometría, extracción de insertos (CAPO Test) y extracción de testigos, los que fueron ensayados a compresión axial hasta su rotura. En total se realizaron alrededor de 2000 determinaciones.

Con los resultados experimentales se obtuvieron 17 correlaciones que permiten estimar la resistencia a compresión, con excelentes coeficientes de regresión.

Se establecieron correlaciones individuales para: 1) resistencia y velocidad del pulso ultrasónico; 2) resistencia y número de rebote y 3) resistencia y fuerza de extracción de insertos. Se establecieron, además, correlaciones múltiples de: 1) resistencia con velocidad y número de rebote y 2) resistencia con velocidad, número de rebote y fuerza de extracción de insertos.

Para comprobar la bondad de las expresiones obtenidas, se eligieron dos estructuras de hormigón en construcción y una construida. En ellas se realizaron determinaciones de END, y sus resultados fueron volcados en las expresiones propuestas. El valor de resistencia a compresión así estimado se comparó con la resistencia media obtenida mediante los ensayos a compresión axial sobre probetas normalizadas, elaboradas para control de calidad de la obra y con testigos extraídos de la obra construida.

La diferencia entre ambas resistencias fue, en las dos obras en construcción, del orden del 15 %, valor que para este tipo de estimación se considera excelente, con lo que se verifica la validez de las expresiones obtenidas.

# **ABSTRACT**

## **CONCRETE STRENGTH ESTIMATION WITH NON DESTRUCTIVE TESTS**

Civil Engineer Domingo Luis Amin

The evaluation of existent structures to be repaired, reinforced and/or recycled for new uses, requires not only knowledge of their constitutive materials as well as knowledge of the parameters for characterization of the present state of those materials.

Considering that reinforced concrete structures are most commonly subject of the mentioned modifications, in this field it is particularly interesting the estimation of the concrete strength of those structures.

An economic and quick method to carry out that, is by using Non Destructive Test (NDT), being ultrasonic pulse velocity, rebound number and core extraction methods the most outstanding ones, which have acquired wide diffusion at the point that their applications is normalized in many of the most advanced codes for construction.

The aim of the present work is to develop expressions to estimate, in conjunction with the results obtained with the experimental methods already mentioned, the strength of concretes elaborated with local materials and technologies.

To obtain the expressions, a wide experimental program was developed.. Four types of concrete with different water/cement ratios were elaborated. 146 cylindrical standard specimens and 11 small slabs were filled with those concretes. They were tested at 7, 28, 60 and 120 days.

On the cylindrical specimens, ultrasonic and rebound number measurements were carried out prior to be tested to axial compression. On the other hand, determinations of the ultrasonic pulse velocity, rebound number, core extractions (CAPO Test) and drilled cores, were done on the slabs. The drilled cores were assayed to axial compression up to their rupture. Around 2000 determinations were done.

With the experimental results, 17 correlations were obtained, for concrete strength estimations, with excellent regression coefficients.

Individual correlations for: 1) strength and pulse velocity; 2) strength and rebound number and 3) strength and extraction force were established. Furthermore, multiple correlations of: 1) strength with pulse velocity and rebound number and 2) strength with pulse velocity, rebound number and extraction force, were obtained.

To check the goodness of the model, two concrete structures under construction and a built one of the local area were chosen. NDT determinations were done and their results were replaced in the proposed models. Then, the concrete strength estimated was compared with the average concrete strength obtained using axial compression test to normalized specimens elaborated for quality control and with cores taken up.

In both of the structures, the difference between the estimated concrete strength (with the model) and the potential concrete strength (with the specimens) was around 15 %. For this estimation, this value is considered excellent, and in this way, the validity of the obtained expressions is confirmed.

# ÍNDICE

	Página
<b>CAPÍTULO I</b>	
1.- OBJETIVO GENERAL.....	2
2.- JUSTIFICACIÓN DEL TEMA PROPUESTO.....	2
3.- CONTENIDO.....	3
<b>CAPÍTULO II</b>	
1.- DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN.....	6
2.- MÉTODOS EMPLEADOS Y EQUIPOS.....	6
2.1.- Determinación del tiempo de pasaje del pulso ultrasónico.....	6
2.1.1.- Factores que influyen en la velocidad del pulso.....	8
2.1.2.- Equipo utilizado.....	9
2.2.- Esclerometría – Determinación del número de rebote.....	9
2.2.1.- Factores que influyen en el número de rebote.....	11
2.2.2.- Equipo utilizado.....	12
2.3.- CAPO Test (Cut and Pull Out Test).....	12
2.3.1.- Equipo utilizado.....	15
2.4.- Extracción de testigos.....	16
2.5.- Ensayo de compresión.....	16
<b>CAPÍTULO III</b>	
1.- ESTADO DEL ARTE.....	19
1.1.- Cuadro de Leslie y Cheesman.....	21
1.2.- Tabla de Whitehurst.....	21
1.3.- Cuadro de R. Jones.....	21
<b>CAPÍTULO IV</b>	
1.- OBJETIVOS PARCIALES.....	25
2.- METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LOS ENSAYOS.....	25
2.1.- Probetas.....	25
2.2.- Placas.....	26
2.2.1.- Cuadrícula realizada en las placas y puntos donde se realizan las de- terminaciones.....	26
3.- ESTUDIO DE LOS MATERIALES UTILIZADOS.....	27
3.1.- Estudio de los agregados.....	27
3.1.1.- Agregado fino.....	27
3.1.1.1.- Granulometría (IRAM 1505).....	27
3.1.1.2.- Peso unitario (IRAM 1548).....	28
3.1.1.3.- Materia orgánica (IRAM 1512).....	28
3.1.1.4.- Material más fino que 74 $\mu$ (IRAM 1540).....	28
3.1.1.5.- Durabilidad por ataque con sulfato de sodio (IRAM 1525).....	28
3.1.1.6.- Análisis petrográfico (IRAM 1649).....	28
3.1.2.- Agregado grueso. ....	28
3.1.2.1.- Peso unitario (IRAM 1548).....	29
3.1.2.2.- Granulometría (IRAM 1505).....	29
3.1.2.3.- Durabilidad por ataque con sulfato de sodio (IRAM 1525).....	30

	<b>Página</b>
3.1.2.4.- Análisis petrográfico (IRAM 1649).....	30
3.2.- Cemento y Agua.....	30
3.3.- Dosificación de hormigones.....	30
3.3.1.- Hormigón C1.....	31
3.3.2.- Hormigón C2.....	31
3.3.3.- Hormigón C3.....	31
3.3.4.- Hormigón C4.....	32
3.3.5.- Resumen de las dosificaciones.....	32
3.4.- Elaboración de las probetas.....	33

## **CAPÍTULO V**

1.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS HORMIGONES ELABORADOS.....	35
1.1.- Procesamiento de resultados.....	35
1.2.- Determinaciones en estado fresco.....	35
1.3.- Determinaciones en estado endurecido.....	35
1.3.1.- Resultados sobre probetas cilíndricas.....	35
1.3.2.- Resultados sobre placas.....	36
2.- ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE LOS RESULTADOS.....	60
2.1.- Valores estadísticos de los ensayos realizados.....	60
2.2.- Probetas de 10 cm x 20 cm. ....	61
2.3.- Probetas de 15 cm x 30 cm.....	62
2.4.- Placas.....	63
3.- GRÁFICOS DE LOS RESULTADOS.....	64
3.1.- Velocidad del pulso ultrasónico para cada relación agua/cemento en función de la edad.....	69
3.2.- Número de rebote para cada relación agua/cemento en función de la edad.....	69
3.3.- Resistencia para cada relación agua/cemento en función de la edad.....	70
4.- RESULTADOS OBTENIDOS EN OBRAS DEL MEDIO.....	70
4.1.- Obra N° 1.....	71
4.2.- Obra N° 2.....	73
4.3.- Obra N° 3.....	74
4.3.1.- Resultados de ensayos sobre las losas.....	74
4.3.2.- Resultados de ensayos sobre las columnas.....	74
4.4.- Trabajos en el Laboratorio de Ensayo de Materiales – U.N.T.....	75

## **CAPÍTULO VI**

1.- ANÁLISIS DE REGRESIÓN.....	78
1.1.- Curvas de correlación.....	78
1.2.- Correlación para 7 días.....	80
1.2.1.- Resistencia vs. velocidad del pulso ultrasónico.....	80
1.2.2.- Resistencia vs. número de rebote.....	80
1.2.3.- Resistencia vs. velocidad y número de rebote.....	80
1.3.- Correlación para 28 días.....	81
1.3.1.- Resistencia vs. velocidad del pulso ultrasónico.....	81
1.3.2.- Resistencia vs. número de rebote.....	81
1.3.3.- Resistencia vs. velocidad y número de rebote.....	81
1.4.- Correlación para 60 días.....	82
1.4.1.- Resistencia vs. velocidad del pulso ultrasónico.....	82

	<b>Página</b>
1.4.2.- Resistencia vs. número de rebote.....	82
1.4.3.- Resistencia vs. velocidad y número de rebote.....	82
1.5.- Correlación para 120 días.....	83
1.5.1.- Resistencia vs. velocidad del pulso ultrasónico.....	83
1.5.2.- Resistencia vs. número de rebote.....	83
1.5.3.- Resistencia vs. velocidad y número de rebote.....	83
1.6.- Correlación para todas las edades.....	84
1.6.1.- Velocidad del pulso ultrasónico.....	84
1.6.2.- Número de rebote.....	85
1.6.3.- Velocidad del pulso ultrasónico y número de rebote.....	85
2.- EXPRESIONES FINALES RESULTANTES.....	86
2.1.- Resistencia con Velocidad del pulso.....	86
2.2.- Resistencia con Número de rebote.....	86
2.3.- Resistencia con Velocidad del pulso y Número de rebote.....	86
3.- VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	86
3.1.- Verificación en elementos fabricados en Laboratorio (placas).....	86
3.2.- Verificación con los resultados obtenidos en obras del medio.....	88
3.3.- Verificación con los resultados obtenidos en obra de San Salvador de Jujuy.....	91
3.4.- Verificación de los resultados en ensayos de rutina del LEM.....	92
 <b>CAPÍTULO VII</b>	
1.- COMPARACIÓN CON OTROS RESULTADOS.....	94
1.1.- Velocidad del pulso ultrasónico.....	94
1.2.- Esclerometría.....	95
1.3.- Velocidad y esclerometría.....	96
 <b>CAPÍTULO VIII</b>	
1.- EXTRACCIÓN DE INSERTOS: CAPO Test.....	98
1.1.- Descripción del ensayo.....	98
1.2.- Determinaciones realizadas.....	99
1.3.- Correlación entre resistencia y fuerza de extracción de insertos.....	100
1.4.- Correlación múltiple.....	100
1.5.- Verificación de los resultados obtenidos en obra de S. S. de Jujuy.....	101
 <b>CAPÍTULO IX</b>	
1.- Conclusiones.....	104
2.- Sugerencias de líneas de investigación.....	107
 <b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
1.- BIBLIOGRAFÍA.....	108

## NOMENCLATURA

<b>v</b>	: Velocidad del pulso ultrasónico
<b>t</b>	: Tiempo
<b>N</b>	: Número de rebote
<b>F</b>	: Fuerza de extracción del inserto
<b>a/c</b>	: Relación agua/cemento (en peso)
<b>C1</b>	: Hormigón C1 $\Rightarrow a/c = 0,71 \Rightarrow \sigma'_{bk} = 13$ MPa
<b>C2</b>	: Hormigón C2 $\Rightarrow a/c = 0,64 \Rightarrow \sigma'_{bk} = 17$ MPa
<b>C3</b>	: Hormigón C3 $\Rightarrow a/c = 0,56 \Rightarrow \sigma'_{bk} = 21$ MPa
<b>C4</b>	: Hormigón C4 $\Rightarrow a/c = 0,44 \Rightarrow \sigma'_{bk} = 30$ MPa
$\sigma'_c$	: Resistencia a la compresión
$\sigma'_i$	: Resistencia a la compresión estimada según la Expresión N° i
$\sigma'_{bk}$	: Resistencia a la compresión característica del hormigón
$\sigma'_{bm}$	: Resistencia a la compresión media del hormigón
<b>M<sub>F</sub></b>	: Módulo de fineza de un agregado
<b>P</b>	: Peso
<b>P<sub>M</sub></b>	: Peso del molde
<b>V<sub>M</sub></b>	: Volumen del molde
<b>P.U.s</b>	: Peso unitario suelto de un agregado
<b>P.U.c</b>	: Peso unitario compactado de un agregado
<b>T<sub>máx</sub></b>	: Tamaño nominal máximo del agregado grueso
$\bar{X}$	: Valor promedio de un parámetro
$\sigma_n$	: Desviación estándar de la población
$\sigma_{n-1}$	: Desviación estándar de la muestra
$\delta$	: Coeficiente de variación
<b>r</b>	: Coeficiente de regresión

## **LISTADO DE FOTOGRAFÍAS**

	<b>Página</b>
<b>Fotografía N° 1.-</b> Determinación del tiempo de pasaje del pulso ultrasónico en probetas.....	7
<b>Fotografía N° 2.-</b> Determinación del tiempo de pasaje del pulso ultrasónico en placas.....	8
<b>Fotografía N° 3.-</b> Determinación del número de rebote en probetas.....	10
<b>Fotografía N° 4.-</b> Determinación del número de rebote en placas.....	10
<b>Fotografía N° 5.-</b> Perforación del orificio (CAPO Test).....	12
<b>Fotografía N° 6.-</b> Ensanchamiento de la perforación (CAPO Test).....	12
<b>Fotografía N° 7.-</b> Colocación del inserto con la arandela expansible.....	13
<b>Fotografía N° 8.-</b> Expansión de la arandela mediante el ajuste de la tuerca.....	13
<b>Fotografía N° 9.-</b> Elementos para la sujeción del extractor.....	14
<b>Fotografía N° 10.-</b> Colocación del extractor.....	14
<b>Fotografía N° 11.-</b> Extracción del inserto.....	15
<b>Fotografía N° 12.-</b> Detalle del inserto extraído con el trozo de hormigón.....	15
<b>Fotografía N° 13.-</b> Extracción de testigos.....	16
<b>Fotografía N° 14.-</b> Ensayo a compresión de probetas de 15 cm x 30 cm.....	17
<b>Fotografía N° 15.-</b> Ensayo a compresión de testigos.....	17
<b>Fotografía N° 16.-</b> Equipo extractor (CAPO Test).....	98

## LISTADO DE TABLAS

	Página
Tabla Nº 1.- Resultados de determinaciones en estado fresco.....	35
Tabla Nº 2.- Resultados de ensayos sobre probetas – Hormigón C1.....	37
Tabla Nº 3.- Resultados de ensayos sobre probetas – Hormigón C2.....	38
Tabla Nº 3.a.- Resultados de ensayos sobre probetas adicionales – Hormigón C2 – 7 días.....	39
Tabla Nº 3.b.- Resultados de ensayos sobre probetas adicionales – Hormigón C2 – 28 días.....	40
Tabla Nº 3.c.- Resultados de ensayos sobre probetas adicionales – Hormigón C2 – 60 días.....	41
Tabla Nº 3.d.- Resultados de ensayos sobre probetas adicionales – Hormigón C2 – 120 días.....	41
Tabla Nº 4.- Resultados de ensayos sobre probetas – Hormigón C3.....	42
Tabla Nº 5.- Resultados de ensayos sobre probetas – Hormigón C4.....	43
Tabla Nº 6.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C1 – 7 días.....	44
Tabla Nº 7.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C1 – 28 días....	45
Tabla Nº 8.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C1 – 60 días....	46
Tabla Nº 9.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C1 – 120 días..	47
Tabla Nº 10.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C2 – 7 días.....	48
Tabla Nº 11.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C2 – 28 días....	49
Tabla Nº 12.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C2 – 60 días....	50
Tabla Nº 13.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C2 – 120 días..	51
Tabla Nº 14.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C3 – 7 días.....	52
Tabla Nº 15.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C3 – 28 días....	53
Tabla Nº 16.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C3 – 60 días....	54
Tabla Nº 17.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C3 – 120 días..	55
Tabla Nº 18.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C4 – 7 días.....	56
Tabla Nº 19.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C4 – 28 días....	57
Tabla Nº 20.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C4 – 60 días....	58
Tabla Nº 21.- Resultados de ensayos sobre placas – Hormigón C4 – 120 días..	59
Tabla Nº 22.- Estadísticas para las determinaciones sobre probetas de 10 x 20	61
Tabla Nº 23.- Estadísticas para las determinaciones sobre probetas de 15 x 30	62
Tabla Nº 24.- Estadísticas para las determinaciones sobre placas.....	63
Tabla Nº 25.- Resumen de resultados sobre probetas – 7 días.....	65
Tabla Nº 26.- Resumen de resultados sobre probetas – 28 días.....	66
Tabla Nº 27.- Resumen de resultados sobre probetas – 60 días.....	67
Tabla Nº 28.- Resumen de resultados sobre probetas – 120 días.....	68
Tabla Nº 29.a.- Valores obtenidos en Sub-Suelo (Obra Nº 1).....	71
Tabla Nº 29.b.- Resultados de ensayos de probetas de Sub-Suelo (Obra Nº 1)....	72
Tabla Nº 30.a.- Resultados de ensayos en Planta Baja (Obra Nº 1).....	72
Tabla Nº 30.b.- Resultados de ensayos sobre probetas de P.B. (Obra Nº 1).....	72
Tabla Nº 31.a.- Resultados de ensayos en 1er. Piso. (Obra Nº 1).....	72
Tabla Nº 31.b.- Resultados de ensayos sobre probetas de 1er. Piso (Obra Nº 1)..	73
Tabla Nº 32.a.- Valores obtenidos en Obra Nº 2.....	73
Tabla Nº 32.b.- Resultados de ensayos sobre probetas (Obra Nº 2).....	73
Tabla Nº 33.- Resultados de ensayos sobre losas (Obra Nº 3).....	74
Tabla Nº 34.- Resultados de ensayos sobre columnas (Obra Nº 3).....	75
Tabla Nº 35.- Valores de ensayos en el LEM – U.N.T.....	76

# LISTADO DE TABLAS

(Continuación)

	Página
Tabla N° 36.- Verificación de los resultados obtenidos sobre elementos fabricados en el Laboratorio (Placas).....	87
Tabla N° 37.- Verificación de resultados en Obras N° 1 y N° 2.....	89
Tabla N° 38.- Idem con expresiones para 28 días.....	90
Tabla N° 39.a.- Verificación en Obra N° 3: Losas.....	91
Tabla N° 39.b.- Verificación en Obra N° 3: Columnas.....	91
Tabla N° 40.- Resumen de valores para correlacionar $\sigma$ con F.....	99
Tabla N° 41.- Resumen de valores para correlación múltiple: $\sigma'$ con v, N y F.....	101
Tabla N° 42.- Verificación de resultados en obra Jujuy (CAPO Test) con la <b>Expresión N° 4</b> .....	101
Tabla N° 43.- Verificación de resultados en obra Jujuy (CAPO Test) con la <b>Expresión N° 5</b> .....	102

## LISTADO DE GRÁFICOS

	<b>Página</b>
<b>Gráfico N° 1.-</b> Granulometría agregado fino.....	27
<b>Gráfico N° 2.-</b> Granulometría agregado grueso.....	29
<b>Gráfico N° 3.-</b> Velocidad del pulso ultrasónico para cada relación agua/cemento, en función de la edad.....	69
<b>Gráfico N° 4.-</b> Número de rebote para cada relación agua/cemento, en fun- ción de la edad.....	69
<b>Gráfico N° 5.-</b> Resistencia del hormigón para cada relación agua/cemento, en función de la edad.....	70
<b>Gráfico N° 6.-</b> Resistencia vs. velocidad – 7 días.....	80
<b>Gráfico N° 7.-</b> Resistencia vs. número de rebote – 7 días.....	80
<b>Gráfico N° 8.-</b> Resistencia vs. velocidad y número de rebote – 7 días.....	80
<b>Gráfico N° 9.-</b> Resistencia vs. velocidad – 28 días.....	81
<b>Gráfico N° 10.-</b> Resistencia vs. número de rebote – 28 días.....	81
<b>Gráfico N° 11.-</b> Resistencia vs. velocidad y número de rebote – 28 días.....	81
<b>Gráfico N° 12.-</b> Resistencia vs. velocidad – 60 días.....	82
<b>Gráfico N° 13.-</b> Resistencia vs. número de rebote – 60 días.....	82
<b>Gráfico N° 14.-</b> Resistencia vs. velocidad y número de rebote – 60 días.....	82
<b>Gráfico N° 15.-</b> Resistencia vs. velocidad – 120 días.....	83
<b>Gráfico N° 16.-</b> Resistencia vs. número de rebote – 120 días.....	83
<b>Gráfico N° 17.-</b> Resistencia vs. velocidad y número de rebote – 120 días.....	83
<b>Gráfico N° 18.-</b> Resistencia vs. velocidad – Todas las edades.....	84
<b>Gráfico N° 19.-</b> Resistencia vs. número de rebote – Todas las edades.....	85
<b>Gráfico N° 20.-</b> Resistencia vs. velocidad y número de rebote – Todas las edades.....	85
<b>Gráfico N° 21.-</b> Comparaciones: Resistencia vs. velocidad.....	95
<b>Gráfico N° 22.-</b> Comparaciones: Resistencia vs. número de rebote.....	95
<b>Gráfico N° 23.-</b> Comparaciones: Resistencia vs. velocidad y número de rebote (para N = 24).....	96
<b>Gráfico N° 24.-</b> Fuerza de extracción vs. Edad.....	99
<b>Gráfico N° 25.-</b> Resistencia vs. Edad.....	99
<b>Gráfico N° 26.-</b> Resistencia vs. Fuerza de extracción.....	100

# **CAPÍTULO I**

## **OBJETIVOS**

## **JUSTIFICACIÓN DEL TEMA**

## **I.1.- OBJETIVO GENERAL**

Se procuró establecer correlaciones entre ensayos destructivos y no destructivos, con el fin de estimar, mediante el empleo de Ensayos No Destructivos (END), la resistencia efectiva o real de hormigones normales, de estructuras construidas, elaborados con materiales de la región y según el arte de la construcción en la zona.

## **I.2.- JUSTIFICACION DEL TEMA PROPUESTO**

Como es conocido, en las últimas décadas se ha podido constatar que una parte cada vez mayor de los gastos en infraestructura se destinan a mantenimiento y reparación de las mismas. En particular en el área de las construcciones, razones de índole principalmente económico han impulsado notablemente la reparación y el reciclado de construcciones dañadas.

Las estructuras de hormigón armado, partes fundamentales de muchas construcciones actualmente dañadas, también se ven afectadas por daños que progresivamente van determinando la necesidad de una intervención, sea ésta para repararlas y/o reforzarlas. La selección del modo en que estas últimas tareas han de ejecutarse, requiere asimismo de la evaluación y diagnóstico previo del estado de la estructura considerada. Así, la necesidad creciente de efectuar este tipo de evaluaciones ha determinado que numerosos códigos de construcción hayan normalizado ensayos no destructivos o in-situ que posibilitan la obtención de información concerniente a estructuras en lo que se refiere a: sus defectos, posible durabilidad, estado de corrosión de las armaduras, resistencia de los materiales constitutivos, entre los cuales generalmente se encuentra el hormigón, etc.

Obviamente, la disponibilidad de datos obtenidos mediante estos ensayos posibilita proyectar soluciones estructurales más racionales, que en la práctica implican la eliminación de gastos provenientes de trabajos de reparación y/o refuerzos innecesarios. Asimismo, dicha información posibilita una evaluación más confiable sobre la seguridad de toda y cada una de las partes de la estructura, tanto en su estado actual, como en sus condiciones finales luego de haber sido reparada y/o reforzada.

Esta finalidad principal referida a estructuras existentes con diferentes tipos de patologías, que hayan sufrido algún siniestro o sean objeto de un cambio de destino o uso y otras que adquieren importancia creciente como por ejemplo el control de calidad en construcciones nuevas, han impulsado la creciente utilización de los ensayos no destructivos o in-situ. Basados en dicha demanda, en la actualidad se desarrollan y perfeccionan nuevas técnicas de ensayo, al tiempo que se estudian y optimizan los métodos y técnicas más convenientes para aplicación de los ensayos conocidos con el fin de hacer a éstos más confiables y precisos.

Las publicaciones nacionales e internacionales sobre este tema evidencian que el mismo es una preocupación importante de los tecnólogos, de los estructuralistas y de los investigadores, los que no han logrado hasta el presente métodos incuestionables que puedan ser introducidos en las normas con el carácter de verdades irrefutables.

Esta propuesta de trabajo se enmarca en el propósito de efectuar una contribución de utilidad práctica a la comunidad técnica relacionada con la tecnología del hormigón, fundamentalmente a la de la región, ya que se trabaja con materiales de la zona y con la metodología usada comúnmente, lo que permitiría obtener mejores estimaciones del valor de la resistencia de un hormigón de una estructura terminada.

### **I.3.- CONTENIDO**

Las tareas previstas y desarrolladas para la elaboración de la presente tesis son las indicadas a continuación:

- 1.- Recopilación bibliográfica: Se recurrió a publicaciones, revistas, memorias de congresos nacionales e internacionales, y normas con el fin de elaborar un estado del arte en el tema propuesto.
- 2.- Se estudió el tema propuesto y otros relacionados.
- 3.- Se estudiaron los métodos no destructivos a utilizar.
- 4.- Se inspeccionaron, estudiaron y adecuaron los equipos para su correcta operatividad.
- 5.- Fueron estudiados los materiales a emplear y se dosificaron con ellos cuatro hormigones con distintas relaciones agua/cemento, usuales en la región.
- 6.- Con estos hormigones, elaborados bajo condiciones y control de laboratorio, se llenaron probetas cilíndricas normalizadas de 15 cm x 30 cm, 10 cm x 20 cm y placas de hormigón simple de 60 cm x 60 cm x 20 cm.
- 7.- Curado: las probetas en cámara húmeda, a excepción de uno de los hormigones, y las placas en el recinto del laboratorio, es decir sin control de humedad ni temperatura.
- 8.- Ensayos:
  - a) Determinación del tiempo de pasaje del pulso ultrasónico. (Probetas)
  - b) Determinación del Número de rebote. (Probetas)
  - c) Determinación de la fuerza de extracción de insertos (CAPO test). (Placas)
  - d) Compresión axial. (Probetas cilíndricas)
  - e) Determinación de la velocidad del pulso ultrasónico, número de rebote y fuerza de extracción de insertos en las placas.
  - f) Extracción de testigos de las placas para realizar el ensayo de compresión axial sobre los mismos.
- 9.- Interpretación de resultados. Análisis estadísticos de los mismos.
- 10.- Se establecieron curvas de correlación entre los valores obtenidos de los ensayos no destructivos y destructivos sobre las probetas de 15 cm x 30 cm y 10 cm x 20 cm.
- 11.- Se estudiaron hormigones de obras del medio, mediante la elaboración de probetas cilíndricas normalizadas de 15 cm x 30 cm y de 10 cm x 20 cm, de hormigones elaborados por firmas privadas del medio y de hormigones elaborados a mano en las mismas obras. Estas probetas se sometieron a las mismas determinaciones que las de los hormigones elaborados en el Laboratorio.
- 12.- Verificación de las expresiones resultantes en estructuras realizadas en el laborato-

rio (placas) y en las obras estudiadas del medio.

- 13.- Comparación de los resultados obtenidos con los de otros autores.
- 14.- Conclusiones
- 15.- Recomendaciones para futuras líneas de investigación.

## **CAPÍTULO II**

**DEFINICIÓN**

**MÉTODOS**

**EQUIPOS**

## II.1.- DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Se define como ensayos no destructivos a **“LAS TÉCNICAS DESTINADAS A INSPECCIÓN O ENSAYO DE UN MATERIAL O DE UNA PIEZA FABRICADA CON ÉL, SIN DAÑAR SU UTILIZACIÓN FUTURA”**.

Una primera clasificación de los tipos de ensayos sobre estructuras divide a estos en tres grupos: **no destructivos, parcialmente destructivos y destructivos**; siendo los correspondientes a los dos primeros grupos los de mayor uso debido a su relativa simplicidad, rapidez y a la posibilidad de realizar con ellos un gran número de determinaciones sin comprometer la integridad de la estructura. En algunos casos es posible la utilización de los ensayos destructivos (extracción de testigos), sin dañar la estructura.

## II.2.- MÉTODOS EMPLEADOS Y EQUIPOS

Los tres métodos de ensayo no destructivo que se emplearon en este trabajo fueron:

- 1.- Determinación del tiempo de pasaje del pulso ultrasónico,
- 2.- determinación del número de rebote mediante el martillo de Schmidt, conocido como esclerómetro, y
- 3.- determinación de la fuerza necesaria para la extracción de un inserto mediante el uso del CAPO Test (Cut and Pull Out).

Por otra parte se ensayaron a la rotura, probetas cilíndricas normalizadas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, cilíndricas de 10 cm por 20 cm y testigos de aproximadamente 7,5 cm de diámetro por 20 cm de altura, extraídos de las placas que se elaboraron.

A continuación son descritos, brevemente, cada uno de los métodos empleados.

### II.2.1.- Determinación del tiempo de pasaje del pulso ultrasónico

Bajo ciertas condiciones se puede relacionar la resistencia del hormigón con la velocidad de ondas longitudinales que pasan a través del mismo. La velocidad del pulso es proporcional a la raíz cuadrada del módulo de elasticidad e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad del hormigón. Teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad del hormigón es proporcional a la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión, como lo sugiere el A.C.I. N° 318 (Ref.27), entonces la velocidad del pulso es proporcional a la resistencia a la compresión. En el hormigón de una estructura, las diferentes dosificaciones o los diferentes grados de compactación en la colocación, su curado, etc., resulta en distintos valores de su resistencia, y, por lo tanto, variaciones en la velocidad del pulso ultrasónico.

Así pues, un descenso en la densidad causado por un incremento en la relación agua/cemento o una compactación deficiente, por ejemplo, hace disminuir tanto la resistencia a la compresión del hormigón como la velocidad de un pulso transmitido a través de éste.

La velocidad de la onda no se determina directamente, sino que se calcula por el tiempo que tarda la pulsación en recorrer una distancia que se mide. Este pulso ultrasónico, se obtiene aplicando un cambio rápido de potencial proveniente de un impulsor transmisor, a un transductor de cristal piezoeléctrico (del griego *piezein* = comprimir) que emite vibraciones en su frecuencia fundamental. Estos transductores pueden ser de cuarzo, titanato de bario, titanato de circonato de plomo, sulfato de litio y en la actualidad piezocristales sintéticos. Al comprimirse el cristal en dos caras paralelas, ellas se cargan eléctrica-

mente, estableciéndose una tensión eléctrica entre ambas. Si se recubren las caras de la placa de cuarzo con láminas metálicas, es posible medir la tensión eléctrica aludida.

El efecto piezoeléctrico es recíproco. Si se someten las dos caras opuestas de la placa de cristal a una tensión eléctrica alternada, se origina en la misma una vibración mecánica de igual frecuencia. De esta manera se pueden provocar vibraciones en la banda superior del ultrasonido, que se propagan al cabezal del aparato como ondas ultrasónicas.

El principio es el siguiente: desde la central pulsadora se emite una señal de alto voltaje y corta duración, que al incidir sobre el cristal piezoeléctrico, lo comprime produciendo una vibración amortiguada que el transductor transmite al hormigón, el transductor receptor recibe esta onda, se cargan eléctricamente las caras del cristal y las placas metálicas registran esta corriente, que es llevada a la central, se registra el tiempo, en microsegundos, que tarda el pulso en ir desde el emisor al receptor. Midiendo el espesor del elemento de hormigón en estudio, en metros, se determina la velocidad a la cual el pulso atravesó el mismo.

$$v = 10^3 \cdot \frac{d}{t}$$

donde:

v = velocidad ultrasónica, expresada en km/s

d = espesor del elemento de hormigón en estudio en m

t = tiempo registrado por el equipo en  $\mu$ s

La Norma **IRAM 1683** establece la forma de realización de este ensayo.

En la **Fotografía N° 1** se observa la medición del tiempo de pasaje de la onda ultrasónica a través de una probeta de 15 cm x 30 cm, y en la **Fotografía N° 2**, lo mismo en las placas utilizadas para este trabajo.



**Fotografía N° 1: Determinación del tiempo de pasaje del pulso ultrasónico en probetas**



Fotografía N° 2: Determinación del tiempo de pasaje del pulso ultrasónico en placas

### II.2.1.1.- Factores que influyen en la velocidad del pulso

- Edad: Al ir endureciendo el hormigón, la velocidad crece aceleradamente para luego disminuir el ritmo de crecimiento.
- Relación a/c: Para hormigones bien compactados, un incremento en la relación agua/cemento, produce un incremento en el porcentaje de vacíos con la consiguiente disminución en la velocidad del pulso.
- Curado: La velocidad del pulso ultrasónico en probetas, aumenta con el tipo de curado, en el siguiente orden: a) curadas al aire, b) curadas en cámara húmeda y c) curadas sumergidas en agua. (Ref. 1). El curado del hormigón en una estructura, también influirá en la velocidad del pulso; esto tiene que ver con el contenido de humedad del hormigón de esa estructura al momento de hacer las determinaciones, como se indica en el ítem siguiente.
- Humedad: La velocidad del pulso aumenta a medida que aumenta el contenido de humedad de la muestra ensayada. Dicho aumento es mayor en hormigones que contienen un gran porcentaje de vacíos. Se han observado variaciones de velocidad del pulso de un 10 % para variaciones de humedad del 3 %. (Ref. 1).
- Relación agregados/cemento: Modificaciones en la relación agregados/cemento, conducen generalmente a cambios en la velocidad del pulso, y no así en la resistencia. Las diferentes proporciones de la mezcla llevan a relaciones diferentes entre la resistencia y la velocidad del pulso, como lo pone de manifiesto Neville (Ref.: 29), citando el trabajo de R. Jones y E.N. Gatfield, "Testing concrete by an ultrasonic pulse technique". También a medida que aumenta el volumen de agregado grueso, aumenta la velocidad del pulso (Ref.: 29), aproximadamente 0,9 MPa por cada 1 % de aumento en el volumen del agregado grueso (S.G. Davis: "The effect of variations in the aggregate

*content of concrete columns upon the estimation of strength by the pulse-velocity method*". De todas maneras, (M.F. Kaplan: "The relation between ultrasonic pulse velocity and the compressive strength of concretes having the same workability by different mix proportions") se ha comprobado que los efectos de un cambio en la relación agregados/cemento se compensa con los cambios en la relación agua/cemento y por lo tanto, a una determinada edad y con una trabajabilidad constante, existe una relación única entre la velocidad del pulso y la resistencia del hormigón, para un determinado conjunto de materiales.

- Tipo de agregado grueso: tiene influencia el tipo de agregado: si es canto rodado o piedra partida (Ref. 18), si se utilizó agregado granítico, caliza, silícea, arcilla expandida, pizarras expandidas, etc., por la densidad de cada uno de los tipos de roca.
- Deterioro del hormigón: la velocidad del pulso se verá afectada por la naturaleza y el grado del deterioro, físico o químico, que el hormigón pueda haber sufrido, en particular cuando se originan fisuras o microfisuras. (Ref. 26 – C597-83)
- Superficie de contacto: ésta debe ser lisa y desprovista de todo tipo de recubrimiento, se deben quitar revestimientos y revoques. Para lograr un buen contacto, debe usarse algún material de acople, como ser vaselina, grasa, etc.
- Acero de refuerzo: La gran mayoría de las estructuras son de hormigón armado, y tienen gran influencia sobre la velocidad del pulso, sobre todo cuando están orientadas paralelas a la trayectoria de las ondas, por lo que se debe estimar, en lo posible, la ubicación de los hierros.
- Otros: También influirán en la velocidad del pulso el uso de distintos tipos de cemento, como así también el de aditivos aceleradores de fragüe o incorporadores de aire (Ref. 1).

En general, este método, al igual que todos los ensayos no destructivos, se utiliza para evaluar la homogeneidad o uniformidad de un hormigón colocado en una estructura.

La principal característica de este ensayo es que interesa a la masa completa del material y no sólo a su superficie como los restantes.

### **II.2.1.2.- Equipo utilizado**

El equipo utilizado para la realización de este trabajo fue el PUNDIT 6, de una frecuencia de 54 kHz, PRF: 10, EHT: 1,2 volts, nro. 97055153, con una precisión de medición de 0,1  $\mu$ s.

### **II.2.2.- Esclerometría - Determinación del número de rebote**

Este ensayo es comúnmente conocido como método del martillo, martillo suizo o martillo de Schmidt, nombre tomado de Ernst Schimdt, quien desarrollara el método.

La prueba está basada en el siguiente principio: el rebote de una masa elástica depende de la dureza de la superficie sobre la que golpea la masa y de la energía capaz de absorber el hormigón.

Una masa impulsada por un resorte tiene una cantidad fija de energía, (en el caso del martillo empleado en este trabajo es de 0,023 J o 0,225 kgm), que se le imprime al extender el resorte hasta una posición determinada; esto se logra presionando el émbolo

contra la superficie del hormigón que se quiere probar. Al liberarse, la masa del émbolo que aún está en contacto con el hormigón rebota y la distancia recorrida por la masa en su rebote, expresada como porcentaje de la extensión inicial del resorte, es lo que se llama número de rebote y es señalado por un indicador que corre sobre una escala graduada. Este número es una medida arbitraria, ya que depende de la energía almacenada en el resorte y del volumen de la masa. En la **Fotografía N° 3** se observa la determinación del número de rebote en una probeta cilíndrica y en la **Fotografía N° 4**, en una de las placas construidas.

La Norma **IRAM 1694** indica la forma de realización de este ensayo.



**Fotografía N° 3: Determinación del número de rebote en probetas**



**Fotografía N° 4: Determinación del número de rebote en placas**

### II.2.2.1.- Factores que influyen en el número de rebote

- La presencia de una piedra o un vacío de tamaño importante justo debajo del émbolo;
- Las proporciones de la mezcla: por la relación agua/cemento del hormigón;
- Ángulo de aplicación: por la acción de la gravedad, el número de rebote varía según la determinación se haga verticalmente (hacia arriba o hacia abajo), en ángulo u horizontalmente. En general, los equipos brindan gráficos donde indican esta variación;
- Humedad: los hormigones en estado seco presentan lecturas mayores que los húmedos, lo que se hace más notable en hormigones de baja resistencia (Ref. 1);
- Carbonatación de la superficie: En el proceso de hidratación del cemento, se producen silicatos de calcio hidratados, y un compuesto alcalino, hidróxido de calcio o portlandita, que provee el pH básico del hormigón. En contacto con el aire, este hidróxido se combina con el dióxido de carbono para formar el carbonato de calcio, reduciendo el pH del hormigón a valores cercanos a 9, o sea menos alcalinos. Este fenómeno es progresivo pero lento y avanza hacia el interior del hormigón, haciendo que las armaduras se oxiden, aumenta el volumen y hay fisuración y descascaramiento del hormigón. Suele comenzar alrededor de los tres meses; puede llegar a ser una capa de 10 mm de espesor más dura que el hormigón, lo cual ocasionará valores de rebote más elevados. Se debe verificar la existencia de carbonatación con fenolftaleína, y si se prueba que hay, se debe pulir la superficie a ensayar. Se recomienda no quitar esta capa por medios mecánicos, ya que al hacerlo podría sacarse en exceso, por lo que ya no se evaluaría al hormigón sino a las partículas de agregado fino, y hasta grueso que pudieran aparecer. Por esto debe hacerse, en forma manual, con la piedra que viene con el equipo. En algunas zonas, con muchas fábricas que emanan mucho dióxido de carbono, por ejemplo, la carbonatación puede producirse aún antes de los 90 días;
- Tipo de agregado: el n° de rebote varía si se trata de agregado grueso liviano o si es piedra granítica, cuarcítica o silíceas; (Ref. 1) debido al módulo de elasticidad de la roca;
- Edad: a edades tempranas hay mucha dispersión pero luego, el número de rebote aumenta continuamente con la edad;
- Uso de desencofrantes: el número de rebote disminuye en el orden del 5% con su uso. “Esta diferencia puede atribuirse a los distintos grados de absorción que han tenido las maderas con y sin desencofrantes, modificando consecuentemente la razón agua/cemento de la superficie del material o a una acción química del aditivo sobre el hormigón que pudo modificar las reacciones de hidratación del cemento”. (Ref. 1);
- Tipo de cemento: el tema fue estudiado por Kolek. Si el cemento es aluminoso el número de rebote es hasta un 100 % mayor, y si es del tipo de supersulfato es un 50 % menor que para el cemento portland normal;
- Forma, textura y rigidez: la pieza sometida a ensayo debe tener un espesor de más de 10 cm. La superficie debe ser lisa o debe pulirse ligeramente y libre de revestimientos. En el caso de ensayarse una probeta, se la debe someter a una carga de aproximadamente el 15 % de la de rotura, para que este último factor no influya en el número de rebote. (Ref. 23).
- Temperatura del hormigón: por debajo de 0 °C, el número de rebote que se obtiene es mucho más alto (Ref. 28). Debe ensayarse el hormigón luego de descongelarse. (Ref. 26, C805-85)

La prueba determina en realidad la dureza de la superficie del hormigón y, aunque

no existe una relación especial entre la dureza y la resistencia, pueden determinarse relaciones empíricas para hormigones similares, curados de determinada forma. De todas maneras, es un ensayo que fundamentalmente se utiliza para determinar la homogeneidad o uniformidad del hormigón en la superficie o apenas bajo ésta.

### **II.2.2.2.- Equipo utilizado**

En este ensayo, el equipo utilizado fue un esclerómetro marca PROCEQ N-20, número 50566, con una energía de impacto de 2,207 N.m

### **II.2.3.- CAPO Test (Cut And Pull Out Test)**

Existen diversas técnicas de ensayos de arrancamiento (pullout test). Las primeras técnicas utilizadas consistían en dejar una pieza de acero de alta resistencia con un anillo en el extremo, empotrado en el hormigón en el momento de su moldeo, luego se procedía a su extracción, lo que sometía al material a solicitaciones de tracción y corte, fundamentalmente esta última, dando lugar a una pequeña rotura en forma de cono a 45° (Ref. 26, C900-87). También se realiza pegando un perno roscado mediante resinas epoxi al hormigón.

Posteriormente, en Dinamarca se desarrolla el LOK-TEST, que consiste en extraer un disco que se encuentra empotrado en el hormigón, evaluándose la fuerza necesaria para extraerlo. Al realizar el ensayo, la falla no se produce por fisuración del hormigón sino por trituración, lo que hace que la fuerza **lok** dependa directamente de la resistencia a compresión. De acuerdo a los resultados obtenidos por otros autores, el ensayo no se ve afectado por la relación a/c, por el tipo, forma y tamaño del agregado grueso (hasta los 38 mm), el tipo de cemento, el tiempo de curado o el contenido de aire.

Para evitar el inconveniente de tener que dejar empotrada la pieza a extraer, se desarrolló el CAPO-TEST (Cut and Pullout Test), (también en Dinamarca).



**Fotografía N° 5: Perforación del orificio**



**Fotografía N° 6: Ensanchamiento de la perforación**

Consiste en calar con un drill en el hormigón endurecido un orificio de 16 mm de diámetro y 65 mm de profundidad, en dirección perpendicular a la superficie. Posterior-

mente con una pieza especial provista por el equipo se realiza un ensanchamiento a 25 mm de profundidad del orificio y de 25 mm de diámetro, paralelo a la superficie.

Este ensanchamiento servirá de alojamiento a la arandela, que se expandirá al ajustar el elemento portaperno, que la contiene. Tanto el perforado como el ensanchamiento se realizan enfriando con agua para evitar el deterioro de los equipos (El agua la provee una pequeña bomba eléctrica que viene con el equipo). Posteriormente se monta el aparato extractor y girando su manija, un sistema hidráulico extrae el perno, midiendo la fuerza de extracción. Se espera que al extraer el perno se produzca una rotura en forma de tronco cónico en el hormigón, dejando la figura de un círculo lo más perfecto posible en la superficie del mismo.

Previo a la realización del ensayo, se debe tener especial cuidado en determinar la ubicación de las armaduras para que éstas no influyan en el resultado del ensayo.

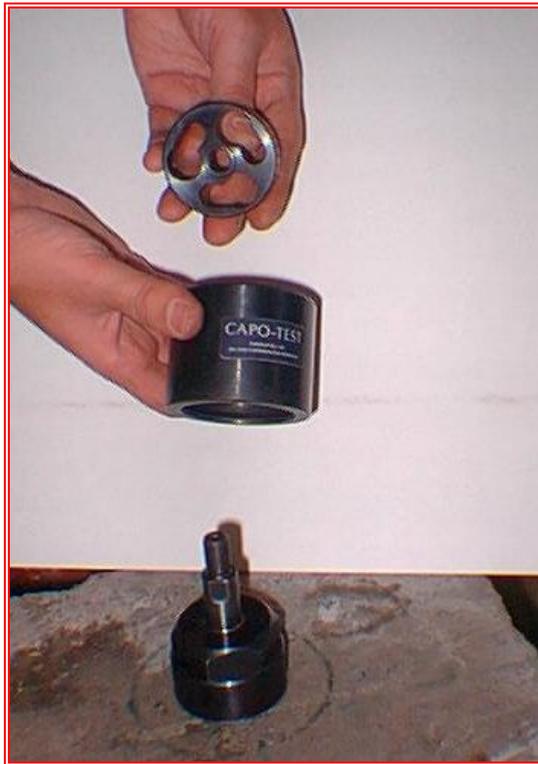
En las **Fotografías 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12** se pueden ver sucesivos pasos que requiere la realización del ensayo.



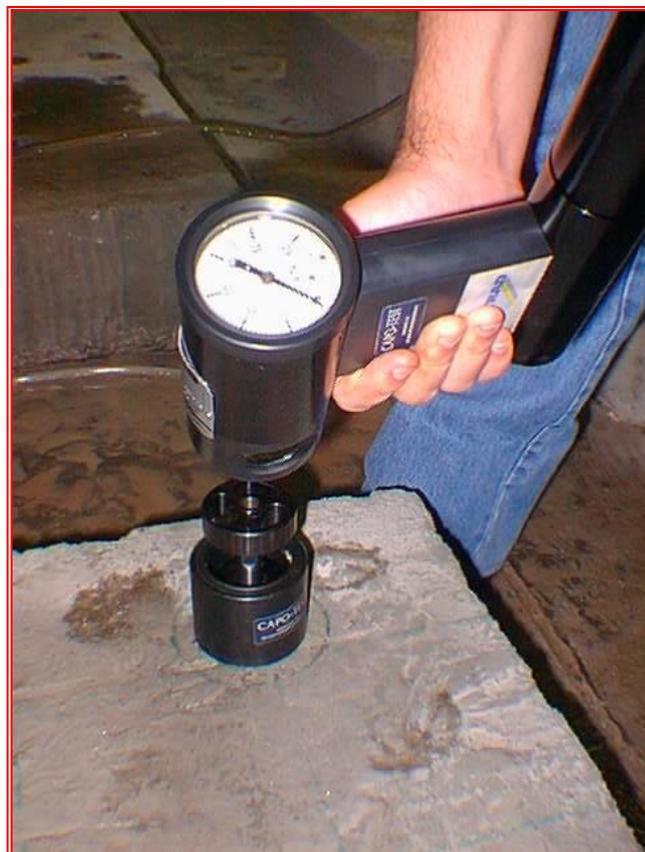
**Fotografía N° 7: Colocación del inserto con la arandela expansible**



**Fotografía N° 8: Expansión de la arandela mediante el ajuste de la tuerca**



**Fotografía N° 9: Elementos para sujeción del extractor**



**Fotografía N° 10: Colocación del extractor**



Fotografía N° 11: Extracción del inserto



Fotografía N° 12: Detalle del inserto extraído con el trozo de hormigón

### II.2.3.1.- Equipo utilizado

El extractor utilizado, número 12-2495, tiene un rango de carga de 2 a 95 kN y trae todo el equipo necesario para la perforación, la realización del ensanchamiento, los anillos expansibles, bomba de agua, etc.

#### **II.2.4.- Extracción de testigos**

Posteriormente a las determinaciones de tiempo de pasaje de la onda ultrasónica, número de rebote y CAPO Test, se realizó la extracción de testigos de las placas confeccionadas con un equipo extractor con motor a explosión marca Briggs & Statton, modelo 133702, tipo 0017 03, código 95111607, de 245 cm<sup>3</sup>, 5 cv a 3700 r.p.m. (máx.)

El proceso de corte requiere de la incorporación de agua para la refrigeración de la herramienta de corte, del hormigón, como así también para arrastrar las partículas sueltas. De acuerdo a la experiencia recogida, el peso propio del motor es suficiente para avanzar en el corte de la masa del hormigón. (**Fotografía N° 13**)



**Fotografía N° 13: Extracción de testigos**

#### **II.2.5.- Ensayo de compresión**

El ensayo de compresión se realizó, según Normas IRAM Nro. 1546 (Hormigones – Método de Ensayo a Compresión) y ASTM C39-86 (Standard Test Method for Compressive Strength of cylindrical Concrete Specimen), en una prensa universal marca AMSLER, número 1033/201, que fuera calibrada en fecha 9-6-98 con una celda de carga marca KYOWA, tipo LC-100TF, serie número 29080004, y una central extensométrica de adquisición de datos KYOWA, UCAM-10 A, número 783511, serie número 601, siendo la escala utilizada la de 100 t.

Tanto en el caso de las probetas de 15 cm x 30 cm y de 10 cm x 20 cm como en el de los testigos, se procedió a realizar un encabezado con azufre con el fin de emparejar las superficies de apoyo, mejorar el paralelismo entre las caras y disminuir el roce con los cabezales de la prensa.

En las **Fotografías N° 14** y **N° 15** se puede apreciar el ensayo de las probetas de 15 cm x 30 cm y los testigos a compresión.



**Fotografía N° 14: Ensayo a compresión de probetas de 15 cm por 30 cm**



**Fotografía N° 15: Ensayo a compresión de testigos**

## **CAPÍTULO III**

### **ESTADO DEL ARTE**

### III.1.- ESTADO DEL ARTE

En los últimos años vienen utilizándose diferentes equipos y técnicas, que permiten estimar numerosas propiedades de interés para la evaluación de estructuras de hormigón con y sin daño. De estas propiedades, la que con mayor frecuencia se desea indagar es la resistencia del hormigón, ya que la misma se utiliza para proyectar y porque es además uno de los parámetros más representativos de la calidad de estructuras tanto nuevas como existentes.

Debido a esta demanda se desarrollaron y estandarizaron diferentes ensayos, entre los que se pueden distinguir como no destructivos a los de esclerometría y ultrasonido; y como parcialmente destructivos a los de pull-out, break-off, pull-off, técnicas de penetración y ensayos de testigos extraídos de las estructuras analizadas.

Pese a las ventajas, fundamentalmente de economía y rapidez, en numerosos trabajos de investigación se ha destacado (Refs. 1,2,3,4) que tanto los ensayos no destructivos como los parcialmente destructivos, presentan el inconveniente de la compleja interpretación de sus resultados, habida cuenta de las distintas variables que los afectan especialmente cuando las determinaciones se realizan sobre estructuras existentes. Dichos estudios han permitido constatar experimentalmente que no existe una correlación universal entre la resistencia y la respuesta del material a la solicitud no destructiva. Esta limitación constituye un serio obstáculo, ya que la incertidumbre en la estimación de la resistencia por métodos basados en la medición directa de las respuestas proporcionadas por cualquiera de estas técnicas puede superar en mucho el valor de  $\pm 30\%$  que dan los manuales de algunos equipos. Así por ejemplo, trabajos experimentales desarrollados por Hamasakki et al (Ref.: 6) y por Suárez y Puebla (Ref.: 5) conducen a la conclusión de que "...en general no se recomienda la aplicación de correlaciones universales de valores de un ensayo no destructivo con las propiedades y característica del hormigón" (Ref. 6); "...la correlación de un dato en función de otro determinado, debe tomarse con precaución dada la probabilidad de incurrir en errores importantes" (Ref. 5) (ya sea por la errónea interpretación de los resultados o la gran cantidad de factores que influyen sobre las determinaciones).

Este hecho, ha conducido al desarrollo y aplicación de diversos métodos operativos y técnicas probabilísticas, lo cual ha permitido reducir los márgenes de disensión; Alberto, Caia y Bonforte proponen órdenes de prelación de los distintos métodos de ensayos, según lo que se busque: calidad de hormigón contratado, resistencia real del hormigón de una estructura o cuando se trata del estudio de la uniformidad o de la presencia de oquedades y otras anomalías en el hormigón (Ref. 7).

En este sentido, se destacan los trabajos de Bungey (Ref. 8) y de Ferreira e Castro y Ubirajara (Ref. 9), que desarrollan un método basado en el estudio de la forma de los histogramas que posibilitó el cálculo de un intervalo de clase para diferenciar distintos tipos de hormigones.

También es de destacar la contribución de Prudêncio y Repette (Ref. 10) quienes desarrollan una metodología para evaluar la conveniencia del empleo de determinado ensayo tanto para la verificación de la homogeneidad de una estructura de hormigón, como para estimar la resistencia a compresión en el caso de haberse determinado una buena correlación entre variables.

Otro método difundido es el de los *coeficientes de influencia*, ideado por Facaoaru, que los ingenieros argentinos Valiente, Valer y Torrent reproducen y verifican (Ref. 11), mediante el cual es posible corregir la correlación resistencia - índice esclerométrico mediante factores determinados experimentalmente para las variables de mayor incidencia.

Más recientemente se realizaron trabajos basados en el método de los ensayos combinados (Refs. 12,13), de acuerdo con el cual se procura una correlación múltiple de resistencia en función de la respuesta a dos o más sollicitaciones no destructivas combinadas, presentando expresiones de correlación para distintos tipos de agregado grueso.

Como extensión del método de los ensayos combinados se han realizado trabajos en los cuales se compara la variabilidad de los resultados obtenidos mediante ensayos no destructivos, con determinados parámetros del hormigón obtenidos a través de ensayos tradicionales, por ejemplo, variando la relación agua/cemento y manteniendo constantes los demás factores que influyen, tanto en la resistencia como en las determinaciones de los ensayos no destructivos (Refs. 10,14).

También se usaron herramientas estadísticas propias del control de calidad industrial, tales como el método Cusum (Ref. 15) el cual permite identificar poblaciones de diferentes hormigones, tal como acontece en el caso de la ejecución de una estructura.

Particularizando para el caso del ensayo ultrasónico, como ventaja del uso de ensayos no destructivos, dentro del rango de carga de la estructura se puede esperar que no haya variación, por lo menos de la velocidad del pulso, con incrementos de carga a la estructura. Popovics llegó a determinar (Ref. 17) que al aumentar la carga en la estructura que provoque una tensión a la compresión de hasta un 20 % de la tensión máxima que pueda soportar, se producirá un leve incremento en la velocidad del pulso, manteniéndose luego constante hasta cargas que produzcan tensiones de compresión del orden del 70 % de la tensión máxima. O sea que el método de la velocidad del pulso ultrasónico se presenta como un buen método para el estudio de la evolución de las características del hormigón, en estructuras en construcción, a edades tempranas.

Sin embargo, otros autores (Ref. 31) indican que a partir de aproximadamente el 50 % de la carga que provoca la tensión máxima admitida por la estructura, el cuadro de fisuración es tan importante que el tiempo de pasaje del pulso a través del hormigón se hace muy grande y por lo tanto la velocidad baja considerablemente, haciéndose la fisuración más importante cuando el tamaño máximo del agregado es mayor.

Cabe destacar también que este método es altamente demostrativo de la uniformidad del hormigón de una estructura, como lo señala la mayoría de los autores, cuando no hubo cambio de agregados o de la dosificación empleada.

En el caso de los ensayos esclerométricos, algunos autores expresan que los mismos son muy dispersos, pero sí pueden servir para comparar hormigones y/o detectar el grado de uniformidad en el hormigón de una estructura dada, pero como se dijo en las características de este ensayo, en la capa superficial o apenas por debajo de ésta (Refs. 7, 11). Pero otros, por lo menos para algunos materiales, sostienen que la correlación con el número de rebote es mejor que con la velocidad del pulso (Ref. 13).

Ahora bien, en algunos casos estudiados, combinando ambos ensayos se reduce notablemente la dispersión de los resultados. Los rangos de resistencia estimados mediante el uso conjunto de esclerometría y ultrasonido son algo superiores a los obtenidos en los ensayos destructivos de los testigos extraídos. En cambio los valores de resistencia en las probetas obtenidas con el mismo hormigón fresco que el puesto en obra, respecto a los estimados mediante el uso combinado de ultrasonido y esclerometría, han diferido en  $\pm 12$  %. Por otra parte, se concluye que el método ultrasónico es una excelente herramienta para determinar las zonas de donde habría que extraer testigos (Ref. 7).

También se afirma que debe prescindirse de los resultados obtenidos mediante ensayos no destructivos si no se tiene en cuenta el tipo de agregados (Ref. 18). Por lo tanto, deben realizarse curvas de correlación para una estructura en especial, o para los tipos de estructuras corrientes para poder aplicarlas con mejores resultados (Ref. 19).

Por lo expuesto, en numerosos casos sea por exceso o por defecto (más generalmente por la segunda situación), se deben enfrentar casos que involucran grados importantes de incertidumbre respecto de la representatividad de los resultados de ensayos y consecuentemente de la posibilidad o no de generalizarlos a la estructura de la que provienen.

En el caso de ultrasonido y de esclerometría, los ensayos no destructivos usados con mayor frecuencia, varios autores han dado tablas o ábacos, en algunos casos con métodos combinados, relacionando la calidad del hormigón con la velocidad del pulso ultrasónico y el número de rebote. Como ejemplo:

### III.1.1.- Cuadro de Whitehurst (*Soniscopes tests concrete structures*, Journal of American Concrete Institute, 47. Febrero de 1951)

Esta Tabla es presentada por Neville (Ref.: 29), aunque en otros textos figura como de Leslie y Cheesman (Aron Helfort), y son cifras sugeridas para hormigones con un peso unitario aproximado de 2400 kg/m<sup>3</sup>.

Velocidad de propagación [km/s]	Calidad general del hormigón
> 4,50	Excelente
4,50 – 3,60	Bueno
3,60 – 3,00	Dudoso
3,00 – 2,10	Generalmente malo
< 2,10	Malo

### III.1.2.- Tabla de Whitehurst (A.C.I. *Evaluation of Concrete Properties from Sonic Test*. 1966)

E. A. Whitehurst da una tabla de la velocidad del pulso que debería tener el hormigón, teniendo en cuenta el tipo de agregado, contenido de cemento, la relación agua/cemento, el asentamiento y la edad del hormigón:

Tipo de árido	Contenido cemento	Asentamiento	Relación a/c	Edad	Velocidad
	kg/m <sup>3</sup>	cm			km/s
Arena natural y granito triturado	270	6,9	0,72	6,5 años	4,20
	360	7,4	0,75		4,55
Arena natural y caliza triturada	278	7,6	0,65	6,5 años	5,20
	365	8,1	0,48		5,37
Arena natural y grava	278	7,1	0,57	6,5 años	4,68
	375		0,42		4,83
Arcillas expandidas y finos livianos	-	5,0	0,88	14 días	3,40
Pizarras expandidas y finos livianos	-	8,9	0,46	857 días	4,00

**III.1.3.- Cuadro de R. Jones** (*Proceedings Highway Research Board*, Vol. 32. 1953)

Este cuadro es citado por Aron Helford. En este caso se tiene en cuenta el tipo de obra, y se dan los valores mínimos de la velocidad del pulso de acuerdo a ella:

TIPO DE OBRA	$v_{\text{mínima}}$ [km/s]
Hormigón pretensado: Secciones T	4,57
Hormigón pretensado: unidades de anclaje	4,35
Hormigón armado: estructuras	4,12
Losas de hormigón suspendidas	4,66

Cabe aclarar aquí que no se hace referencia a las características de los materiales empleados en cada tipo de estructura, y como es sabido, estos tienen mucha influencia sobre la velocidad del pulso.

En trabajos más recientes, se proponen expresiones que relacionan los valores de resistencia obtenidos en probetas normalizadas ensayadas a compresión con la velocidad del pulso ultrasónico, determinaciones con martillo de rebote y combinaciones de ambas. Por ejemplo:

a) Castro & Ribeiro (Hormigón normal):  $\sigma'_c = 0,002559 \cdot e^{2,071 \cdot v}$   $r^2 = 0,975$   
 (Ref. 21) (con  $\sigma_c$  en MPa y  $v$  en km/s)

$$\sigma'_c = 0,148 N^{1,554} \quad r^2 = 0,979$$

$$\sigma'_c = 27,52v + 0,56N - 110,94$$

Donde:  $\sigma'_c$  = resistencia a la compresión del hormigón  
 $v$  = velocidad del pulso ultrasónico  
 $N$  = número de rebote  
 $r$  = coeficiente de correlación

b) Amín (Hormigón liviano): (Ref. 20)  $\sigma'_c = 24,36 \cdot v - 68,41$   $r^2 = 0,721$   
 (con  $\sigma_c$  en MPa y  $v$  en km/s)

$$\sigma'_c = 1,96N - 38,04 \quad r^2 = 0,672$$

$$\sigma'_c = 15,3v + 0,95N - 63,32 \quad r^2 = 0,774$$

c) Guerrero, Torrent, Valiente: (Ref. 14) 1.- Hormigón de canto rodado a 28 días

$$\sigma'_c = 2096 \times 10^{-7} \cdot e^{2429 \times 10^{-6} \cdot v} \quad r^2 = 0,922$$

2.- Hormigón de basalto triturado a 28 días

$$\sigma'_c = 4412 \times 10^{-6} \cdot e^{1857 \times 10^{-6} \cdot v} \quad r^2 = 0,922$$

donde  $\sigma_c$  se expresa en MPa y  $v$  en m/s

d) Halpern: (hormigón alivianado) (Ref. 19)  
(con  $\sigma_c$  en MPa y v en km/s)

$$\sigma'_c = 6,5N + 0,155.v - 555$$

e) Di Maio, Traversa, Giovambatista: (piedra partida granítica) (Ref. 12)

$$\sigma'_c = 64,6.v - 261,0$$

$$r^2 = 0,785$$

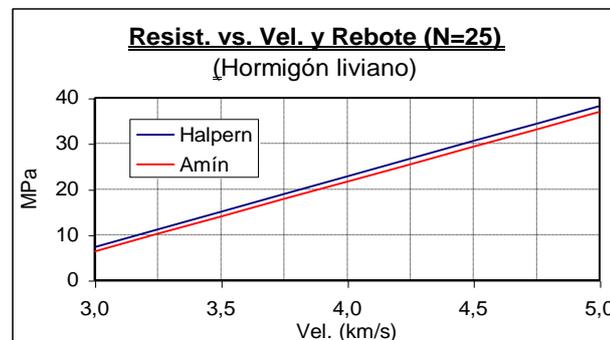
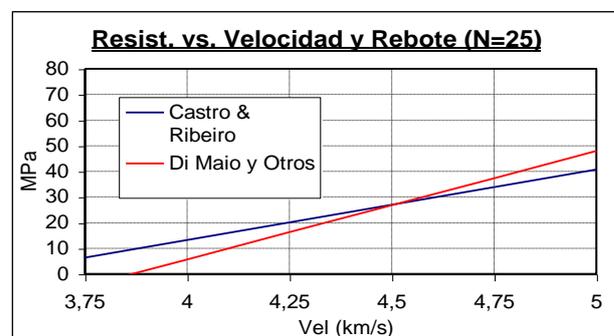
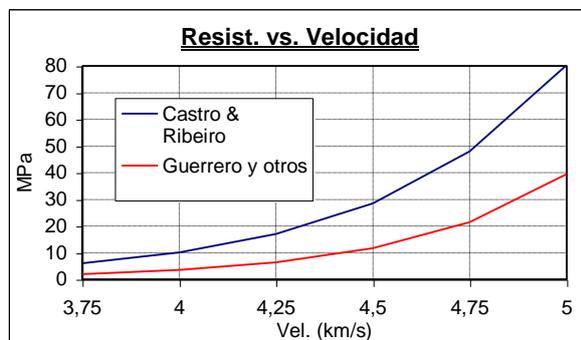
$$\sigma'_c = 1,3.N - 5,7$$

$$r^2 = 0,618$$

$$\sigma'_c = 42,2.v + 0,6.N - 178,1$$

$$r^2 = 0,835$$

donde  $\sigma_c$  se expresa en MPa y la velocidad en km/s



Se puede apreciar en los gráficos precedentes las diferencias entre las expresiones de distintos autores, salvo en el caso de los hormigones livianos en los que se utilizó para su confección el mismo tipo de agregado grueso.

Por lo antes expresado y ante la gran variabilidad de los resultados obtenidos por los distintos autores, se consideró de importancia la determinación de expresiones de correlación entre la resistencia a la compresión y los valores que suministran los distintos Ensayos No Destructivos para los hormigones elaborados con materiales de la región Noroeste del país y según la tecnología usual en la zona, para los cuales no se conocen estudios anteriores sobre el tema.

De todas maneras, y como lo expresa nuestro reglamento C.I.R.S.O.C. 201, en las modificaciones del año 1997, Capítulo 6, apartado 6.4.4, sobre Ensayos Complementarios: “los resultados de los **ensayos no destructivos** no se emplearán para reemplazar a los resultados de testigos o probetas moldeadas, ni como evidencia para decidir la aprobación o el rechazo del hormigón cuestionado por falta de resistencia”.

## **CAPÍTULO IV**

### **TRABAJO EXPERIMENTAL**

#### **IV.1.- OBJETIVOS PARCIALES:**

- Determinar el grado de representatividad de los resultados obtenidos con diversos métodos de ensayo referidos a la resistencia del hormigón.
- Establecer correlaciones entre la resistencia a compresión simple del hormigón y los ensayos no destructivos de velocidad del pulso ultrasónico y de número de rebote, en forma individual, para cada edad de ensayo y sin tener en cuenta la edad del hormigón.
- Analizar las posibilidades y limitaciones del método combinado (ultrasonido - esclerometría) como procedimiento de estimación de la resistencia a compresión de hormigones de características variadas pero habituales en la región.
- Analizar las posibilidades de correlacionar la fuerza de extracción (CAPO Test) con la resistencia del hormigón.
- Analizar las posibilidades de correlacionar en forma combinada los tres métodos de ensayos estudiados con la resistencia del hormigón.

#### **IV.2.- METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LOS ENSAYOS**

##### **IV.2.1.- Probetas**

Se llenaron 66 probetas cilíndricas normalizadas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, 80 probetas cilíndricas normalizadas de 10 cm x 20 cm, de cuatro dosificaciones propuestas: Relaciones agua/cemento: **0,44; 0,56, 0,62 y 0,71**, que corresponden, aproximadamente, a hormigones **H30, H21, H17 y H13**, respectivamente, elaborados con canto rodado. Las mismas fueron curadas en cámara húmeda, a excepción de las probetas elaboradas con el hormigón **H13 (C1)**, que se curaron en ambiente de laboratorio.

En trabajos anteriores realizados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la U.N.T., se ha comprobado que la variación en la resistencia del hormigón obtenida en probetas normalizadas y en las de 10 cm x 20 cm, no supera el 5 %, siendo generalmente mayor en la probeta pequeña. Esta verificación se realizó aún para tamaños de agregado grueso mayores que el aceptado por el reglamento CIRSOC (19 mm). Por lo tanto se confeccionaron este tipo de probetas a los fines de un manejo más cómodo de las mismas, ahorro de material y la posibilidad de trabajar con prensas de menor capacidad.

Tanto en las probetas de 15 cm x 30 cm como en las de 10 cm x 20 cm se determinó en primer lugar el tiempo de pasaje del pulso ultrasónico, teniendo cuidado de colocar grasa en los puntos de aplicación de los transductores con el fin de obtener un buen contacto entre el hormigón y los transductores (Ref.: 22). Seguidamente las probetas se colocaron en la prensa y con aproximadamente el 40 % de la carga estimada de rotura, con el fin de lograr una firme sujeción de la probeta (la Norma IRAM N° 1694 lo fija en el 15 %) se hicieron las determinaciones del número de rebote. Esto último se realizó sobre 3 generatrices ubicadas a 120° obteniéndose en las probetas de 30 cm de altura tres lecturas a distintas alturas de la misma y dos en las de 20 cm (Ref.: 23). Por último las probetas fueron encabezadas con azufre para lograr paralelismo entre las caras y tener una mejor superficie de contacto entre las caras de las probetas y los cabezales de la máquina de compresión y se ensayaron hasta la rotura, a fin de determinar la resistencia a compresión. El mismo procedimiento descrito se usó para cada edad del hormigón, esto es, a las edades de 7, 28, 60 y 120 días.

En las obras en construcción se llenaron probetas cilíndricas normalizadas de 15 cm x 30 cm y de 10 cm x 20 cm, de hormigones elaborados por empresas del medio y de

hormigones elaborados en obra para el colado en distintos elementos estructurales de las mismas. Estas probetas se sometieron a las mismas determinaciones que las realizadas en los hormigones elaborados en el Laboratorio pero solamente a la edad de 28 días. El curado se realizó en obra, con el mismo tratamiento que el hormigón colado en éstas. En total fueron ensayadas 34 probetas.

#### **IV.2.2.- Placas**

Con el fin de verificar las expresiones de correlación obtenidas, además de las verificaciones sobre obras del medio, en las cuales no se puede tener un control adecuado, se elaboró en el Laboratorio un modelo elemental de estructura. Éste consistió en una placa de hormigón simple de 60 cm de lado por 20 cm de altura, que se llenó al mismo tiempo y con el mismo hormigón con que se llenaron las probetas cilíndricas.

Se elaboraron 11 placas de este tipo con las cuatro dosificaciones propuestas. Las mismas fueron curadas en el ambiente del Laboratorio, en el mismo lugar en donde se llenaron, tapadas con un plástico hasta la edad de 7 días y luego descubiertas, para simular condiciones de obra.

En ambas caras de las placas se realizó una retícula de 15 cm de lado, de forma tal de facilitar la realización de las lecturas de los ensayos de ultrasonido y de esclerometría. En primer lugar se determinó el tiempo de pasaje del pulso en cada zona demarcada. Esto fue realizado con las placas colocadas en forma vertical (Ver **Fotografía N° 2**). Posteriormente las placas fueron volcadas, aleatoriamente en cuanto a la superficie expuesta, para obtener el número de rebote, realizar el CAPO Test, del cual se realizaron 2 (dos) determinaciones para las edades de 7, 28 y 60 días y 3 (tres) para los 120 días, y finalmente obtener los testigos, en igual número que para las extracciones de insertos, los que posteriormente fueron sometidos a compresión simple, previo encabezado al igual que las probetas, hasta su rotura. Estos ensayos también fueron realizados a las edades de 7, 28, 60 y 120 días.

Como se expresó en el Capítulo II, punto 2.2.1, la textura superficial donde se realice la determinación del número de rebote, influye en el resultado, por lo que el valor obtenido en este caso está influenciado por la superficie sobre la cual se determinó, es decir si era la cara superior de la placa o la inferior.

##### **IV.2.2.1.- Cuadrícula realizada y puntos donde se realizan las determinaciones**

En cada sector marcado, de 15 cm de lado, se obtuvo una medición del tiempo de pasaje del pulso, y cinco determinaciones de esclerometría, de las que se indica el promedio en las tablas correspondientes. Se calculó el promedio y se descartaron los valores que se apartaban en  $\pm 5$  números y se volvió a calcular el promedio, esta vez con los valores restantes.

1	2	3	4
5	6	7	8
9	10	11	12
13	14	15	16

Cabe aclarar que, como se aprecia en la **Fotografía N° 4**, al realizar la determinación del número de rebote colocando el esclerómetro hacia abajo, se deben hacer correcciones en los valores obtenidos, para poder compararlos con los que se obtienen en for-

ma horizontal (forma normal de uso del equipo), tal cual lo indican los manuales del equipo. Analizando los gráficos y las tablas que proporcionan estos y la Norma IRAM 1694 (Ref. 23), a cada determinación obtenida de esta manera, debieron **descontarse "3 puntos"**.

### IV.3.- ESTUDIO DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

#### IV.3.1.- Agregados

##### IV.3.1.1.- Agregado fino

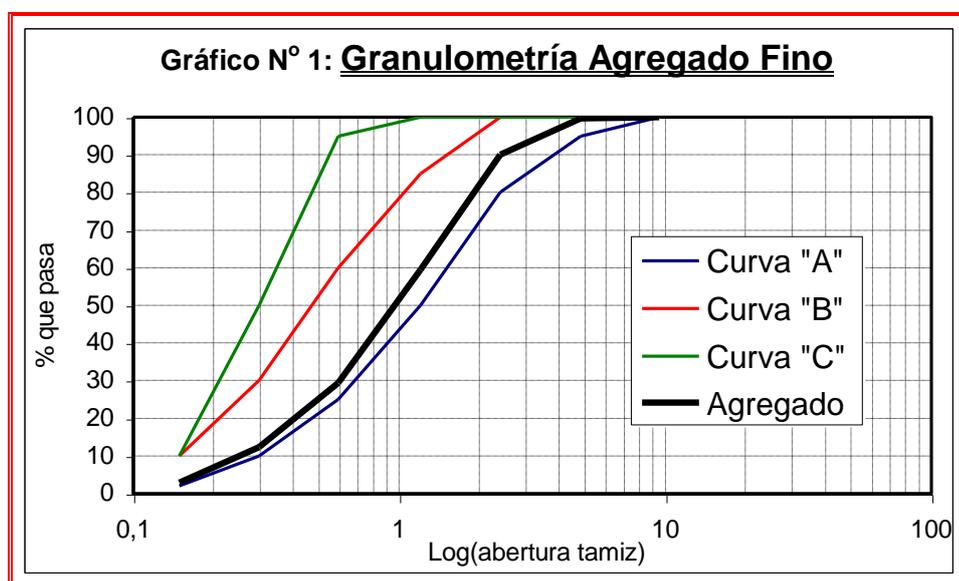
El agregado fino es una arena mediana obtenida de una cantera ubicada sobre el Río Salí, al Este de la ciudad de San Miguel de Tucumán, que es proveedora de muchas obras del medio como así también de plantas elaboradoras de hormigón.

##### IV.3.1.1.1.- Granulometría (Según Norma IRAM 1505)

Tamiz	Muestra I			Muestra II			Prom.
	Ret.	Ret.	Ret.Ac.	Ret.	Ret.	Ret.Ac.	Ret.Ac.
Nro.	g	%	%	g	%	%	%
4	3,0	0	0	4,5	0	0	0,0
8	115,8	10	10	119,3	9	9	9,5
16	348,4	30	40	395,3	31	40	40,0
30	339,3	30	70	391,6	30	70	70,0
50	193,7	17	87	222,6	18	88	87,5
100	111,7	10	97	119,6	9	97	97,0
Fondo	33,2	3	100	33,6	3	100	100,0
	1145,1			1286,5			

Módulo de fineza:

$$M_F = 3,04$$



**IV.3.1.1.2.- Peso Unitario (P.U.): (IRAM 1548)**

$P_M = 15,3 \text{ kg}$

$V_M = 7,55 \text{ l}$

1) Suelto:  $P_{M+ag.} = 27,4 \text{ kg}$

$P.U._S = 1603 \text{ kg/m}^3$

2) Compactado:  $P_{M+ag.} = 28,1 \text{ kg}$

$P.U._C = 1695 \text{ kg/m}^3$

**IV.3.1.1.3.- Materia orgánica: (IRAM 1512)**

A los efectos de determinar la presencia de materia orgánica se procedió a realizar este ensayo cualitativo, determinándose que la arena utilizada, presenta **menos de 500 ppm** de materia orgánica, por lo cual es aceptable para su utilización en hormigones.

**IV.3.1.1.4.- Material más fino que 74  $\mu\text{m}$ : (IRAM 1540)**

$P_{\text{inicial}} = 300 \text{ g}$

$P_{\text{final}} = 295 \text{ g}$

$$\% \text{ finos} = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100 = 1,67 \%$$

**IV.3.1.1.5.- Durabilidad por ataque con sulfato de sodio (IRAM 1525)**

Material retenido en tamiz	Graduación de la muestra original	Peso fracciones, antes del ensayo	Pérdida real	Pérdida corregida por graduación	Número de partículas afectadas
Nro. (mm)	%	g	%	%	
50 (0,297)	24,50	100	6,00	1,47	---
30 (0,590)	21,60	100	4,55	0,698	---
16 (1,2)	23,14	100	3,10	0,72	---
8 (2,4)	15,94	100	2,20	0,35	---
4 (4,8)	0,28	100	2,00	0,01	---
			Totales	<b>3,53</b>	

**IV.3.1.1.6.- Análisis petrográfico (IRAM 1649)**

El material fue estudiado en la Facultad de Ciencias Naturales de la U.N.T. y presentó la siguiente composición:

55 % de cuarzo de vena

25 % de fragmentos metamórficos constituidos por cuarzo, plagioclasa y biotita

15 % de feldespatos

5 % de minerales accesorios (muscovita, turmalina y magnetita)

**IV.3.1.2.- Agregado Grueso**

El agregado grueso fue adquirido en la misma cantera que el agregado fino y corresponde a un canto rodado lavado.

**IV.3.1.2.1.- Peso Unitario (P.U.): (IRAM 1548)**

1) Suelto:  $P_{M+ag.} = 27,8 \text{ kg}$

$$P.U.S = 1656 \text{ kg/m}^3$$

2) Compactado:  $P_{M+ag.} = 28,0 \text{ kg}$

$$P.U.C = 1682 \text{ kg/m}^3$$

**IV.3.1.2.2.- Granulometría (IRAM 1505)**

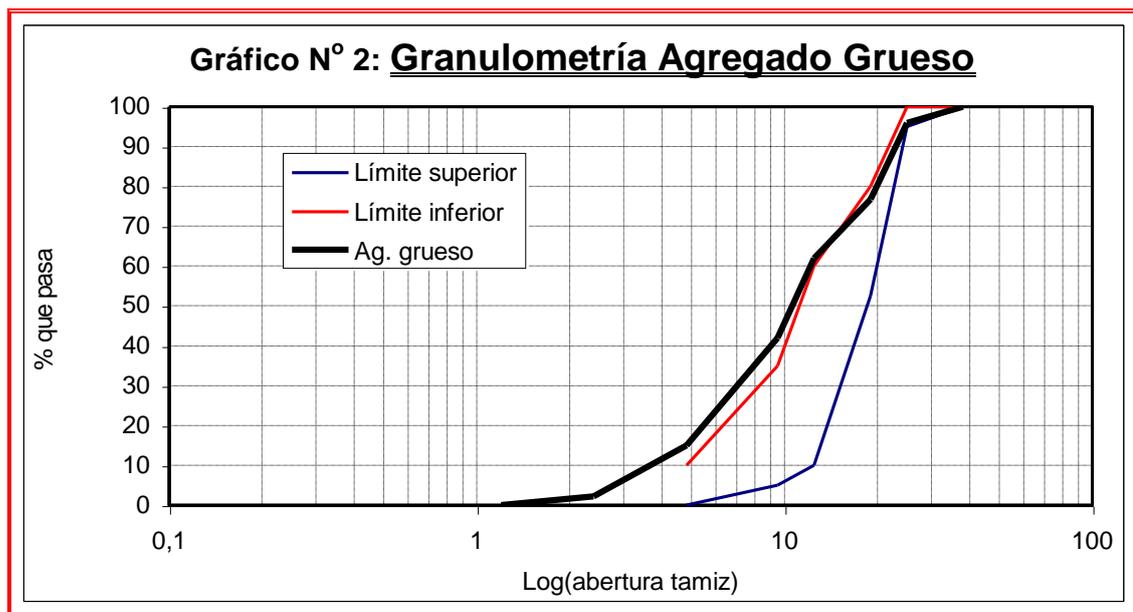
Tamiz pulg.	Ret. gr	Ret. %	Ret.Ac. %
1	2100	4,1	4,1
3/4	9760	19,1	23,2
1/2	7590	14,8	38,0
3/8	10280	20,1	58,1
# 4	13835	27,0	85,1
# 8	6480	12,7	97,8
Fondo	1170	2,2	100,0
	51215		

El módulo de fineza obtenido fue:

$$M_F = 6,64$$

y el tamaño nominal máximo:

$$T_{m\acute{a}x} = 1 \text{ ''}$$



**IV.3.1.2.3.- Durabilidad por ataque con sulfato de sodio (IRAM 1525)**

Material retenido en tamiz	Graduación de la muestra original	Peso fracciones, antes del ensayo	Pérdida real	Pérdida corregida por graduación	Número de partículas afectadas
Pulg. (mm)	%	g	%	%	
3/4 (19,0)	28,95	500	0,47	0,12	---
3/8 (9,5)	50,37	1000	0,16	0,08	---
# 4 (4,8)	10,68	300	1,67	0,18	---
			Totales	<b>0,38</b>	

**IV.3.1.2.4.- Análisis petrográfico (IRAM 1649)**

Este estudio también fue realizado en la Facultad de Ciencias Naturales de la U.N.T.

El material de mayor tamaño estaba constituido por rocas metamórficas de bajo grado, grano muy fino, cuya composición mineralógica es biotita, clorita, cuarzo y feldespatos, de tonalidades grisáceas y moradas. Algunos de los clastos presentaron delgadas venillas de cuarzo-feldespato de vena de 1 ó 2 mm de espesor.

El material intermedio tenía la siguiente composición litológica:

73,45 % de metamorfitas homogéneas, de grano muy fino y tonalidades grises, moradas y verdes, similares mineralógicamente a las descriptas antes.

13,22 % de clastos de origen también metamórfico, de similar mineralogía, pero atravesadas por numerosas venillas de cuarzo de 0,5 a 1,0 mm de espesor.

11,77 % de fragmentos cuarzo-feldespáticos de venas.

1,56 % de rodados de origen granítico-tonalítico, masivos de color claro y grano fino, en donde se reconoce principalmente cuarzo, plagioclasa y biotita.

El material más fino estaba constituido por:

74,36 % de fragmentos metamórficos homogéneos, similares a los ya descriptos.

22,30 % de clastos cuarzo-feldespático de venas

2,17 % de concreciones carbonáticas

1,17 % de material granítico.

**IV.3.2.- Cemento y Agua**

El cemento utilizado fue un cemento portland normal, de una fábrica ubicada en El Alto, Prov. de Catamarca, de comercialización en el medio, adquirido sin ningún condicionamiento en un corralón de esta ciudad, con poco estacionamiento y todo de la misma partida.

En cuanto al agua, se utilizó la de la red de agua potable de la ciudad.

**IV.3.3.- Dosificación de los Hormigones**

Se realizaron cuatro dosificaciones en función de la relación agua/cemento, siendo las siguientes:

- Hormigón C1:** Relación a/c = 0,71 ⇒ aproximadamente **H13**
- Hormigón C2:** Relación a/c = 0,62 ⇒ aproximadamente **H17**
- Hormigón C3:** Relación a/c = 0,56 ⇒ aproximadamente **H21**
- Hormigón C4:** Relación a/c = 0,44 ⇒ aproximadamente **H30**

Para la dosificación de los hormigones se utilizó una combinación de los métodos del ACI (American Concrete Institute) y del CIRSOC (Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles), en "Datos Tecnológicos del Hormigón Normal" (DTHN), que se ha comprobado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales que provee muy buenos resultados.

#### IV.3.3.1.- Hormigón C1:

1.- de Tabla V (ACI), relación a/c: **A/C = 0,71**  $\Rightarrow \sigma'_{bm} = 18$  MPa

lo que significa:  $\sigma'_{bk} \cong \sigma'_{bm} - 5$  MPa = 13 MPa

2.- Cantidad de agua y cemento: del DTHN

$$A = 180 \text{ dm}^3 \Rightarrow C = 180/0,71 = 254 \text{ kg}$$

3.- Volumen de sólidos ( $V_s$ ):  $V_s = 1000 - 180 - \frac{254}{3,15} - 10 = 729,4 \text{ dm}^3$

4.- Relación  $\frac{s}{s+g}$  % (según DTHN):  $s = 0,41$   $g = 0,59$

5.-  $s = 729,4 \times 2,65 \times 0,41 = 793 \text{ kg}$

$g = 729,4 \times 2,65 \times 0,59 = 1141 \text{ kg}$

#### IV.3.3.2.- Hormigón C2:

1.- de Tabla V (ACI), relación a/c: **A/C = 0.62**  $\Rightarrow \sigma'_{bm} = 22$  MPa

lo que significa:  $\sigma'_{bk} \cong \sigma'_{bm} - 5$  MPa = 17 MPa

2.- Cantidad de agua y cemento: del DTHN

$$A = 180 \text{ dm}^3 \Rightarrow C = 180/0,62 = 290 \text{ Kg}$$

3.- Volumen de sólidos:  $V_s = 1000 - 180 - \frac{290}{3,15} - 10 = 717,8 \text{ dm}^3$

4.- Relación  $\frac{s}{s+g}$  % (según DTHN):  $s = 0,41$   $g = 0,59$

5.-  $s = 717,8 \times 2,65 \times 0,41 = 780 \text{ kg}$

$g = 717,8 \times 2,65 \times 0,59 = 1122 \text{ kg}$

#### IV.3.3.3.- Hormigón C3:

1.- de Tabla V (ACI), relación a/c: **A/C = 0.56**  $\Rightarrow \sigma'_{bm} = 26$  MPa

lo que significa:  $\sigma'_{bk} \cong \sigma'_{bm} - 5$  MPa = 21 MPa

2.- Cantidad de agua y de cemento:

$$A = 180 \text{ dm}^3 \quad C = 321 \text{ kg}$$

- 3.- Volumen de sólidos:  $V_s = 1000 - 180 - \frac{321}{3,15} - 10 = 708.0 \text{ dm}^3$
- 4.- Relación  $\frac{s}{s+g}$  %:  $s = 0,41$   $g = 0,59$
- 5.-  $s = 708.0 \times 2,65 \times 0,41 = 769 \text{ kg}$   
 $g = 708.0 \times 2,65 \times 0,59 = 1107 \text{ kg}$

#### IV.3.3.4.- Hormigón C4:

- 1.- de Tabla V (ACI), relación a/c: **A/C = 0.44**  $\Rightarrow \sigma'_{bm} = 35 \text{ MPa}$   
 lo que significa:  $\sigma'_{bk} \cong \sigma'_{bm} - 5 \text{ MPa} = 30 \text{ MPa}$
- 2.- Cantidad de agua y de cemento:  
 $A = 180 \text{ dm}^3$   $C = 409 \text{ kg}$
- 3.- Volumen de sólidos:  $V_s = 1000 - 180 - \frac{409}{3,15} - 10 = 680 \text{ dm}^3$
- 4.- Relación  $\frac{s}{s+g}$  %:  $s = 0,41$   $g = 0,59$
- 5.-  $s = 680 \times 2,65 \times 0,41 = 739 \text{ kg}$   
 $g = 680 \times 2,65 \times 0,59 = 1063 \text{ kg}$

#### IV.3.3.5.- Resumen de las dosificaciones

##### Hormigón C1

Material	Cantidad
	kg/m <sup>3</sup>
Agua	180
Cemento	254
Ag. Fino	793
Ag. Grueso	1141
P <sub>unitario</sub> teórico	2368 kg/m <sup>3</sup>

##### Hormigón C2

Material	Cantidades
	kg/m <sup>3</sup>
Agua	180
Cemento	290
Arena	780
Canto rodado	1122
P <sub>unitario</sub> teórico	2372 kg/m <sup>3</sup>

Hormigón C3

Material	Cantidades
	kg/m <sup>3</sup>
Agua	180
Cemento	321
Arena	769
Canto rodado	1107
P <sub>unitario</sub> teórico	2377 kg/m <sup>3</sup>

Hormigón C4

Material	Cantidades
	kg/m <sup>3</sup>
Agua	180
Cemento	409
Arena	739
Canto rodado	1063
P <sub>unitario</sub> teórico	2391 kg/m <sup>3</sup>

IV.3.4.- Elaboración de los hormigones

El hormigón empleado en el llenado de las probetas y de las placas se elaboró utilizando una hormigonera de 250 l con motor eléctrico. Se realizaron los siguientes pasos:

- Se humedeció la pera de la hormigonera.
- El orden de llenado de la hormigonera fue el siguiente: **agua, agregado grueso, cemento y agregado fino.**
- Se corrigieron las dosificaciones por el contenido de humedad del agregado fino, ya que se determinó previamente que éste era del 4%.
- Se realizó un pastón, de la misma dosificación corregida, de cada hormigón, de 20 l con el fin de empastar las paredes de la pera, y así evitar que ésta le quite la pasta al hormigón definitivo.
- El pastón definitivo se realizó en dos etapas, debido a su volumen. Con cada uno de los dos pastones se llenaron parte de las placas, la mitad de las probetas de 15 cm x 30 cm y la mitad de las probetas de 10 cm x 20 cm. También con este pastón se realizó la determinación del asentamiento.
- El llenado de las probetas se realizó como se indica a continuación:
  - a) Probetas de 15 cm x 30 cm: (IRAM 1524) se llenaron en tres capas, compactando cada una de ellas con 25 golpes con varilla normalizada. Luego se enrasaron.
  - b) Probetas de 10 cm x 20 cm: se llenaron en dos capas, compactando también cada una con 25 golpes de la varilla.
  - c) Placas: en dos capas, compactando con la varilla y golpes con la misma en los laterales de los encofrados.

Las probetas fueron desmoldadas a las 24 horas y llevadas a la cámara húmeda y las placas a las 72 horas, esperando un mayor endurecimiento del hormigón para evitar la rotura de los bordes y vueltas a cubrir con el plástico como se indicó anteriormente.

# **CAPÍTULO V**

## **RESULTADOS**

**V.1.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LOS HORMIGONES ELABORADOS****V.1.1.- Procesamiento de resultados**

Con los resultados obtenidos a partir de las probetas de 10 cm x 20 cm y de las de 15 cm x 30 cm, se buscaron las correlaciones más convenientes, es decir aquellas que presentaron un mejor coeficiente de correlación, esto es tanto para las correlaciones individuales como para la combinada.

Se realizó esto para cada edad, para todos los hormigones y posteriormente, sin tener en cuenta la edad de los hormigones, con todos los resultados obtenidos.

Las curvas de mejor coeficiente de correlación fueron empleadas con el fin de estimar la resistencia del hormigón en el modelo de estructura creado en el Laboratorio, y en las obras estudiadas. En el primer caso se comparó la resistencia estimada con la obtenida en el ensayo a compresión de los testigos extraídos de las placas. En las obras, se comparó con la resistencia obtenida en el ensayo a compresión de las probetas confeccionadas en las mismas obras, en el momento del hormigonado de los distintos elementos estructurales, y en la obra construida con testigos extraídos de algunos elementos estructurales.

**V.1.2.- Determinaciones en estado fresco**

El peso unitario real ( $P_{UR}$ ) fue determinado en un molde cuyo peso vacío es de 15,3 kg y su volumen de 7,55 l, llenado en 3 (tres) capas y compactándose cada una de ellas con 25 golpes de una varilla de acero de 16 mm de diámetro y punta roma (IRAM 1562).

El asentamiento se determinó empleando un Cono de Abrams y siguiendo las especificaciones de la Norma IRAM N ° 1536.

**Tabla N° 1**

<b>Hormigón</b>	<b>P<sub>unitario real</sub></b>	<b>Asentamiento</b>
	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>cm</b>
<b>C1</b>	2.380	10,0
<b>C2</b>	2.347	15,0
<b>C3</b>	2.367	8,0
<b>C4</b>	2.367	7,0

**V.1.3.- Determinaciones en estado endurecido**

A continuación se presentan las tablas con los resultados de los ensayos realizados, tanto en probetas como en placas, para posteriormente proceder al análisis de los mismos.

**V.1.3.1.- Resultados sobre probetas cilíndricas**

Las **Tablas N°s 2, 3, 4 y 5** contienen en ese orden, los resultados de ensayos realizados sobre las probetas moldeadas con los 4 tipos de hormigones elaborados.

En las mismas se indican resultados de: velocidad de la onda ultrasónica, número de rebote y rotura por compresión de las probetas de 10 cm x 20 cm y 15 cm x 30 cm. Los valores consignados corresponden a resultados obtenidos a las edades de 7, 28, 60 y 120 días.

Debido a que el hormigón identificado como **C2** es el de uso más frecuente en el medio, se realizó con él una nueva serie de probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura. Los valores obtenidos se vuelcan en las **Tablas N<sup>os</sup> 3a, 3b, 3c y 3d**. Los ensayos de medición del tiempo de pasaje del pulso ultrasónico se realizaron sobre todas las probetas, determinándose el número de rebote solamente en aquellas que se ensayan a compresión en la fecha correspondiente.

#### **V.1.3.2.- Resultados sobre placas**

Las **Tablas N<sup>os</sup> 6** a la **21**, contienen los resultados de los ensayos sobre las placas. En ellas se volcaron los resultados de la velocidad del pulso ultrasónico, número de rebote, fuerza de extracción de insertos (CAPO Test) y de compresión de los testigos extraídos de las mismas. Cada planilla corresponde a cada tipo de hormigón y a cada edad.

**Tabla N° 2: Resultados de ensayos sobre probetas: HORMIGÓN C1**

$\sigma'_{bk}$  (esperada): 13 MPa      Asentamiento: 10 cm

Prob.	Dimensiones		Edad	Velocidad		N° de Rebote				Rotura		
	Diám.	Altura		Ind.	Prom.	1	2	3	Prom.	Carga	Tens.	Prom.
N°	cm		Días	km/s	km/s	número				kN	MPa	
1	10	20	7	4,26	4,19	10-12	11-12	11-13	12,1	72	9,1	9,2
2				4,17		11-10	11-13	12-15		67	8,5	
3				4,14		10-13	16-10	16-16		73	9,3	
4				4,17		10-12	12-14	10-11		75	9,7	
5				---		---	---	---		---	---	
6			28	4,22	4,33	23-22	22-19	23-28	23,1	124	15,8	17,3
7				4,32		25-19	25-20	24-21		138	17,9	
8				4,35		24-20	24-19	24-20		132	16,8	
9				4,41		22-19	28-24	26-23		140	18,2	
10				4,36		25-23	27-25	28-22		138	17,9	
11			60	4,38	4,29	28-29	27-25	25-22	25,1	140	18,2	18,7
12				4,34		26-27	24-24	30-26		148	18,8	
13				4,22		23-26	25-29	31-25		140	18,2	
14				4,31		30-26	25-23	24-21		150	19,1	
15				4,20		20-21	20-20	22-22		152	19,4	
16			120	4,07	4,15	23-22	23-22	24-25	23,4	130	16,9	16,6
17				4,17		27-22	23-23	29-26		140	17,8	
18				4,13		20-22	24-25	23-22		128	16,3	
19				4,18		23-20	21-23	24-22		120	15,3	
20				4,22		20-23	27-23	25-24		128	16,6	
21	15	30	7	4,04	4,09	11-17-18	13-13-17	15-13-14	14,3	166	9,5	9,7
22				4,08		19-16-13	17-15-12	17-16-12		166	9,4	
23				4,14		10-11-13	10-14-17	12-17-15		178	10,2	
24			28	4,25	4,27	24-21-22	24-23-19	25-19-20	24,3	280	15,8	16,5
25				4,32		31-25-20	28-25-21	29-22-21		284	16,3	
26				4,23		30-24-20	28-27-24	31-27-26		304	17,4	
27			60	4,34	4,35	26-24-20	25-22-20	27-26-22	25,2	334	18,9	19,0
28				4,39		31-25-22	25-24-24	29-20-22		326	18,4	
29				4,32		32-28-22	31-25-26	29-30-24		348	19,7	
30			120	4,38	4,36	26-25-24	30-26-24	28-27-26	26,3	350	19,8	20,1
31				4,36		28-25-28	30-25-26	32-24-25		374	21,5	
32				4,35		26-23	26	27-27		336	19,0	

**Tabla N° 3: Resultados de ensayos sobre probetas: HORMIGÓN C2**

$\sigma'_{bk}$  (esperada): 17 MPa

Asentamiento: 15 cm

Prob. N°	Dimensiones		Edad Días	Velocidad		N° de Rebote				Rotura		
	Diám.	Altura		Ind.	Prom.	1	2	3	Prom.	Carga kN	Tens. MPa	Prom.
	cm			km/s	km/s	número					MPa	
1	10	20	7	4,24	4,32	14-12	14-18	14-14	13,7	103	13,1	13,8
2				4,45		14-14	10-12	12-18		109	13,9	
3				4,27		14-11	15-13	11-11		92	11,7	
4				4,32		14-11	17-20	14-12		128	16,3	
5				---		---	---	---		---	---	
6			28	4,42	4,40	16-15	15-18	15-20	19,4	142	18,4	21,1
7				4,42		20-22	22-21	19-19		168	21,8	
8				4,35		18-18	23-22	24-24		156	20,3	
9				4,37		21-20	20-20	22-19		174	22,6	
10				4,42		20-18	18-17	18-18		174	22,2	
11			60	---	4,51	---	---	---	23,2	---	---	25,5
12				4,47		23-20	20-18	19-20		172	22,3	
13				4,49		23-22	20-26	25-26		208	26,5	
14				4,42		24-22	22-23	24-27		170	22,1	
15				4,64		24-28	22-26	27-26		238	30,9	
16			120	4,61	4,56	27-24	27-25	25-26	25,1	200	26,5	29,0
17				4,55		26-23	25-26	27-26		210	27,3	
18				4,45		25-22	22-23	24-26		252	33,4	
19				4,65		25-27	24-27	24-26		218	28,6	
20				---		---	---	---		---	---	
21	15	30	7	4,24	4,21	15-14-16	15-14-17	14-13-16	15,2	228	12,9	13,1
22				4,20		17-18-15	14-12-12	13-16-15		236	13,4	
23				4,20		18-14-12	17-13-18	17-18-17		232	13,1	
24			28	4,38	4,40	22-15-17	22-20-23	19-16-14	18,9	355	20,4	20,3
25				4,36		17-16-20	17-20-18	22-16-18		346	19,6	
26				4,45		20-17-18	20-20-16	22-24-20		368	20,8	
27			60	4,44	4,47	25-22-26	28-23-22	27-25-21	25,3	418	23,6	22,8
28				4,52		28-25-25	30-24-24	26-28-29		392	22,2	
29				4,47		28-22-21	27-24-22	29-25-26		402	22,7	
30			120	4,52	4,59	26-24-25	29-28-24	29-24-24	25,0	476	26,9	27,1
31				4,61		28-25-24	26-28-26	29-25-29		440	25,9	
32				4,62		23-22-23	22-23-23	22-22-21		496	28,4	

Tabla N° 3a: Resultados de ensayos sobre probetas adicionales:  
**HORMIGÓN C2**

Ensayos a 7 días

Prob. N°	long. cm	diám. cm	Vel, km/s	Rebote			Rotura		
				número			Prom	kN	MPa
1	29,9	14,9	4,41	26	23	25	22,6	302	17,3
				21	20	20			
				23	22	23			
2	29,9	---	4,33	---	---	---	---	---	---
3	29,8	---	4,26	---	---	---	---	---	---
4	29,8	---	4,35	---	---	---	---	---	---
5	29,9	---	4,35	---	---	---	---	---	---
6	29,8	---	4,33	---	---	---	---	---	---
7	29,9	15,0	4,22	20	21	22	19,9	275	15,5
				20	18	23			
				19	17	19			
8	29,9	---	4,35	---	---	---	---	---	---
9	29,8	---	4,29	---	---	---	---	---	---
10	30,1	---	4,27	---	---	---	---	---	---
11	30,0	---	4,34	---	---	---	---	---	---
12	29,9	---	4,26	---	---	---	---	---	---
13	30,0	15,0	4,23	23	19	22	20,0	272	15,4
				20	20	20			
				19	18	19			
14	30,0	---	4,21	---	---	---	---	---	---
15	30,1	---	4,21	---	---	---	---	---	---
16	30,0	---	4,29	---	---	---	---	---	---
17	30,1	---	4,31	---	---	---	---	---	---
18	30,2	---	4,25	---	---	---	---	---	---
<b>Promedios</b>			<b>4,29</b>	<b>21,2</b>			<b>16,1</b>		

**Tabla N° 3b: Resultados de ensayos sobre probetas adicionales:  
HORMIGÓN C2**

Ensayos a 28 días

Prob. N°	long. cm	diám. cm	Vel. km/s	Rebote			Prom	Rotura	
				número				kN	MPa
2	29,9	15,0	4,42	25	22	22	22,0	400	22,6
				20	21	22			
				22	23	21			
4	29,8	15,0	4,44	23	22	23	21,7	428	24,2
				21	21	20			
				21	23	21			
5	29,9	--	4,57	--	--	--	--	--	
6	29,8	--	4,45	--	--	--	--	--	
8	29,9	15,0	4,46	23	22	24	21,9	386	21,8
				24	21	20			
				20	21	22			
9	29,8	15,0	4,38	27	30	24	23,9	396	22,4
				23	22	24			
				26	20	20			
10	30,1	15,1	4,41	20	26	23	23,3	384	21,7
				26	23	23			
				20	24	25			
11	30,0	--	4,41	--	--	--	--	--	
12	29,9	--	4,36	--	--	--	--	--	
14	30,0	15,0	4,41	26	24	23	22,9	374	21,2
				21	22	22			
				21	22	24			
15	30,1	14,9	4,43	27	26	28	24,3	374	21,4
				24	25	22			
				20	26	21			
16	30,0	15,0	4,47	31	25	24	23,4	380	21,5
				25	22	21			
				20	22	21			
17	30,1	--	4,46	--	--	--	--	--	
18	30,2	-	4,40	--	--	--	--	--	
<b>Promedios</b>			<b>4,44</b>	<b>22,6</b>			<b>22,6</b>		

**Tabla N° 3c: Resultados de ensayos sobre probetas adicionales:  
HORMIGÓN C2**

Ensayos a 60 días

Prob. N°	long. cm	diám. cm	Vel. km/s	Rebote			Prom	Rotura	
				número				kN	MPa
5	29,9	15,0	4,53	30	28	29	30,3	478	27,0
				33	29	29			
				38	27	30			
6	29,8	---	4,54	---	---	---	---	---	
11	30,0	15,0	4,53	26	26	25	25,4	442	25,0
				25	22	28			
				25	28	24			
12	29,9	---	4,44	---	---	---	---	---	
17	30,1	15,0	4,53	24	28	29	26,6	432	24,4
				22	26	30			
				24	27	29			
18	30,2	---	4,48	---	---	---	---	---	
<b>Promedios</b>			<b>4,51</b>	<b>27,4</b>				<b>25,5</b>	

**Tabla N° 3d: Resultados de ensayos sobre probetas adicionales:  
HORMIGÓN C2**

Ensayos a 120 días

Prob. N°	long. cm	diám. cm	Vel. km/s	Rebote			Prom	Rotura	
				número				kN	MPa
6	29,8	15,	4,50	31	32	28	28,4	452	25,6
				28	26	30			
				28	26	27			
12	29,9	14,9	4,31	25	26	29	26,8	472	27,1
				28	25	26			
				28	28	26			
18	30,2	15,	4,40	27	28	30	27,7	430	24,3
				29	30	26			
				25	30	24			
<b>Promedios</b>			<b>4,40</b>	<b>27,6</b>				<b>25,7</b>	

**Tabla N° 4: Resultados de ensayos sobre probetas: HORMIGÓN C3**

$\sigma'_{bk}$  (esperada): 21 MPa      Asentamiento: 8,5 cm

Prob.	Dimensiones		Edad	Velocidad		N° de Rebote				Rotura		
	Diám.	Altura		Ind.	Prom.	1	2	3	Prom.	Carga	Tens.	Prom.
N°	cm		Días	km/	km/s	número				kN	MPa	
1	10	20	7	4,20	4,28	24-24	20-22	26-21	21,7	132	17,1	18,0
2				4,27		22-24	22-20	22-24		147	19,1	
3				4,29		23-22	24-24	23-20		128	16,3	
4				4,26		20-21	20-22	22-19		141	18,3	
5				4,40		22-20	19-19	20-20		148	19,2	
6			28	4,74	4,68	24-20	18-23	21-24	23,5	210	27,3	27,2
7				4,59		20-20	24-24	22-26		208	26,5	
8				4,70		22-25	20-24	24-27		220	28,0	
9				4,66		27-23	20-27	20-25		210	27,3	
10				4,70		23-23	28-28	26-27		206	26,7	
11			60	4,66	4,60	24-27	28-24	26-26	25,7	204	26,5	29,1
12				4,53		28-26	23-24	27-30		230	29,9	
13				4,57		28-24	27-30	26-24		232	30,1	
14				4,67		23-26	28-25	27-26		234	29,8	
15				4,56		20-24	24-28	24-24		226	29,4	
16			120	4,70	4,68	27-30	26-29	28-29	29,1	248	32,2	32,6
17				4,68		28-31	32-30	29-27		244	31,7	
18				4,68		25-28	30-33	33-28		252	32,7	
19				4,72		27-29	29-31	30-29		266	34,6	
20				4,64		29-28	29-27	29-32		238	31,6	
21	15	30	7	4,25	4,23	---	---	---	17,8	305	17,3	17,8
22				4,23		15-16-17	20-22-18	14-19-20		325	18,4	
23				4,21		18-16-14	20-18-16	20-17-21		308	17,7	
24			28	4,67	4,61	21-22-24	24-28-22	28-25-28	25,1	460	26,0	24,2
25				4,57		22-27-26	27-28-30	25-24-27		460	26,0	
26				4,59		24-22-26	28-24-21	28-26-22		362	20,5	
27			60	4,53	4,59	25-26-25	29-28-28	30-28-29	27,4	477	26,9	26,9
28				4,61		28-29-28	30-26-26	29-27-28		462	26,1	
29				4,63		28-26-26	28-26-27	27-28-26		782	27,6	
30			120	4,61	4,65	34-26-29	31-33-28	28-28-26	29,6	592	33,5	32,6
31				4,63		28-25-29	29-29-28	31-30-29		562	32,2	
32				4,71		30-30-29	36-30-31	31-32-30		558	32,0	

**Tabla N° 5: Resultados de ensayos sobre probetas: HORMIGÓN C4**

$\sigma'_{bk}$  (esperada): 30 MPa      Asentamiento: 7 cm

Prob.	Dimensiones		Edad	Velocidad		N° de Rebote				Rotura		
	Diám.	Altura		Ind.	Prom.	1	2	3	Prom.	Carga	Tens.	Prom.
N°	cm		Días	km/s	km/s	número				kN	MPa	
1	10	20	7	4,35	4,45	16-20	19-18	17-18	20,4	200	26,0	24,2
2				4,47		17-17	20-19	25-25		172	22,3	
3				4,53		22-24	24-23	24-22		190	24,2	
4				4,48		21-24	22-16	22-16		192	24,9	
5				4,40		19-20	17-22	19-24		186	23,7	
6			28	4,62	4,63	28-28	26-27	31-31	27,5	240	31,2	30,6
7				4,69		28-31	28-28	27-28		237	30,2	
8				4,69		27-30	24-30	29-28		219	28,5	
9				4,59		26-26	29-32	26-30		248	32,2	
10				4,59		25-24	24-24	25-25		238	30,9	
11			60	4,62	4,67	29-26	30-32	27-28	29,5	276	35,9	33,9
12				4,72		33-33	30-25	28-32		256	33,9	
13				4,67		32-26	26-27	30-28		262	34,0	
14				4,66		30-28	29-29	30-32		263	34,9	
15				4,66		31-38	31-27	29-29		236	30,7	
16			120	4,94	4,79	32-32	29-32	32-29	30,5	32,6	42,4	41,5
17				4,73		26-26	25-27	27-32		28,6	37,2	
18				4,82		30-28	29-34	28-36		29,3	38,1	
19				4,71		28-30	30-32	34-37		33,7	42,9	
20				4,76		34-36	28-31	30-30		36,2	47,0	
21	15	30	7	4,51	4,49	---	---	---	24,7	390	22,1	22,3
22				4,46		26-26-24	28-26-25	26-27-26		396	22,7	
23				4,49		26-24-24	24-22-21	21-24-24		390	22,1	
24			28	4,60	4,66	36-37-31	32-30-30	38-37-28	32,6	509	28,8	29,1
25				4,64		40-30-28	36-28-38	38-30-34		501	28,7	
26				4,74		34-38-28	29-28-30	33-28-30		517	29,7	
27			60	4,64	4,61	32-32-29	38-30-31	33-30-30	31,5	478	27,0	30,3
28				4,61		32-28-30	31-32-30	36-28-28		594	34,1	
29				4,59		34-27-28	32-28-27	28-27-30		520	29,8	
30			120	4,67	4,71	30-30-32	29-32-30	33-28-28	30,6	622	35,2	36,2
31				4,76		31-30-36	31-32-28	34-33-30		648	37,2	
32				4,69		32-30-34	28-29-28	28-30-31		630	36,1	

**Tabla N° 6: Resultados de ensayos sobre placas: Hormigón C1: Edad: 7 días**

Espesores: P1 = 19,2 cm  
P2 = 19,4 cm

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C1	1	10	11	---	---	10	---	---	---	---	---	---	---	---	--	--	10	10,2	10,1
	2	10	10	---	10	11	---	---	10	10	10	10	---	---	10	10	---	10,1	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C1	1	4,30	4,15	3,98	3,95	4,16	4,02	3,96	4,11	4,00	4,03	3,95	3,99	4,12	4,17	4,06	4,07	4,06	4,09
	2	4,17	4,24	4,13	4,19	4,25	4,00	3,93	4,09	4,22	4,02	4,13	4,13	4,06	4,13	4,07	4,11	4,12	

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T1 (Placa 1)	7,1	41,0	10,4
T2 (Placa 2)	7,1	41,0	10,4

Tabla N° 7: Resultados de ensayos sobre placas: Hormigón C1: Edad: 28 días

Espesores: P1 = 19,2 cm  
P2 = 19,4 cm

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C1	1	18	20	18	17	20	18	18	20	19	19	20	20	18	19	19	19	18,9	18,0
	2	15	17	18	18	17	17	17	16	15	17	17	17	19	19	17	17	17,1	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C1	1	4,29	--	4,16	4,07	4,28	4,13	--	4,23	4,19	4,09	4,13	4,15	4,25	4,22	4,14	4,15	4,18	4,21
	2	4,30	--	4,25	4,28	4,21	4,10	4,26	4,16	4,29	4,14	4,20	4,28	4,21	4,34	4,26	4,24	4,23	

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T1 (Placa 1)	7,2	66,0	16,2
T3 (Placa 3)	7,1	62,0	15,7

**Tabla N° 8: Resultados de ensayos sobre placas: Hormigón C1: Edad: 60 días**

Espesores: P1 = 19,2 cm  
P2 = 19,4 cm

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C1	1	15	18	17	15	16	19	15	19	16	19	19	17	15	15	15	17	16,7	17,5
	2	19	19	18	20	18	19	17	17	17	16	17	19	22	19	19	17	18,3	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C1	1	4,29	4,29	4,34	4,31	4,24	4,28	4,27	4,28	4,31	---	4,32	4,38	4,16	4,25	---	4,50	4,30	4,30
	2	4,27	4,35	4,46	4,40	4,31	4,25	4,22	4,38	4,25	4,28	4,13	4,27	4,27	4,30	---	4,43	4,30	

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T2 (Placa 2)	7,0	7	18,2
T3 (Placa 3)	7,2	83	20,4

**Tabla N° 9: Resultados de ensayos sobre placas: Hormigón C1: Edad: 120 días**

Espesores: P1 = 19,2 cm  
P2 = 19,4 cm

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C1	1	26	25	23	24	27	24	26	27	26	24	27	28	25	25	24	24	25,3	24,6
	2	25	24	24	23	24	23	24	26	24	22	24	23	25	22	25	22	23,8	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C1	1	4,43	4,47	4,38	4,37	4,31	4,45	4,31	4,32	4,47	4,39	---	4,36	4,49	---	4,34	4,30	4,38	4,36
	2	4,44	---	4,38	4,39	4,31	4,20	4,32	4,33	4,38	4,26	4,32	4,40	4,38	4,25	4,33	4,33	4,33	

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T1 (Placa 1)	7,3	110	26,3
T2 (Placa 2)	7,3	106	25,3

Tabla N° 10: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C2: Edad: 7 días**

Espesores: P1 = 18.9 cm  
 P2 = 19.2 cm  
 P3 = 19.0 cm

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C2	1	---	13	---	13	10	13	11	---	---	10	---	13	11	10	---	13	11,7	12,3
	2	10	16	12	---	---	12	---	10	13	13	13	11	---	15	14	12	12,6	
	3	11	12	12	11	---	11	10	---	12	16	13	13	10	12	13	15	12,2	

**Velocidad (km/s)**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C2	1	4,25	4,23	4,30	4,32	4,22	4,29	4,28	4,42	4,23	4,15	4,30	4,25	4,13	4,18	4,20	4,22	4,25	4,26
	2	4,29	4,35	4,30	4,24	4,36	4,30	4,40	4,26	4,31	4,35	4,37	4,31	4,24	4,28	4,25	4,37	4,31	
	3	4,19	4,24	4,22	4,28	4,28	4,26	4,22	4,20	4,25	4,19	4,23	4,23	4,20	4,09	4,38	4,27	4,23	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción
N°	kN
2	9,0
3	9,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T1 (Placa 1)	7,1	64,0	16,2
T2 (Placa 2)	7,2	68,0	16,7

Tabla N° 11: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C2: Edad: 28 días**

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C2	1	22	26	16	18	25	18	21	21	27	26	17	26	19	29	20	15	22,0	20,6
	2	21	21	23	25	19	19	20	15	28	23	19	23	21	21	26	25	20,8	
	3	19	21	21	26	19	19	21	17	19	15	18	17	17	17	20	17	17,0	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C2	1	4,29	4,25	4,32	4,27	4,26	4,27	4,21	4,29	4,32	4,42	4,39	---	4,36	4,38	4,32	4,34	4,31	4,36
	2	4,55	4,37	4,43	4,42	4,40	4,32	4,42	4,40	4,35	4,54	4,41	---	4,39	4,40	4,45	---	4,43	
	3	4,28	4,27	4,45	4,39	4,30	4,33	4,38	4,25	4,38	4,34	4,42	4,41	4,27	4,32	4,29	4,39	4,35	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción
N°	kN
2	24,0
3	18,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T1 (Placa 1)	7,3	118,0	28,2
T3 (Placa 3)	7,3	94,0	22,5

Tabla N° 12: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C2: Edad: 60 días**

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C2	1	27	23	27	23	28	29	27	23	24	23	22	21	25	26	23	25	24,6	23,1
	2	22	22	25	25	23	22	27	21	23	30	23	25	23	27	25	23	24,1	
	3	18	25	21	19	19	22	19	20	23	22	21	23	21	21	20	17	20,7	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C2	1	4,38	4,43	4,26	4,43	4,43	4,52	4,41	---	4,43	4,44	4,40	4,43	4,32	4,41	4,39	4,44	4,42	4,43
	2	4,32	4,49	4,49	---	4,47	4,50	4,52	---	4,52	4,51	4,41	---	4,62	4,45	4,51	---	4,48	
	3	4,37	4,33	4,36	4,47	4,51	4,45	4,43	4,45	4,48	4,36	4,35	4,40	4,37	4,27	4,49	4,38	4,40	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción
N°	kN
1	26,0
3	24,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T2 (Placa 2)	7,5	100,0	22,6
T3 (Placa 3)	7,3	128,0	30,6

Tabla N° 13: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C2: Edad: 120 días**

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C2	1	25	35	24	27	33	26	27	27	31	27	25	29	--	31	26	25	26,1	25,8
	2	25	27	31	28	25	25	25	27	24	24	26	29	27	31	26	29	26,8	
	3	26	25	23	26	24	22	27	26	25	23	23	26	22	25	25	25	24,6	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C2	1	4,46	4,51	4,49	4,44	4,52	4,58	4,55	4,49	4,47	4,50	4,51	---	---	4,44	4,43	4,42	4,49	4,45
	2	4,40	4,47	4,48	---	4,41	4,54	---	4,51	---	4,55	4,49	4,42	4,62	4,39	4,49	---	4,48	
	3	4,31	4,32	4,37	4,33	---	4,42	4,45	4,43	4,43	4,37	4,37	4,42	---	4,35	4,55	4,45	4,40	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción	
N°	kN	
1	28,5	28,0
2	23,0	23,5
3	22,5	22,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
		cm	kN
T1 (Placa 1)	7,1	144,0	36,4
T2 (Placa 2)	7,0	148,0	38,5
T3 (Placa 3)	7,1	122,0	30,8

**Tabla N° 14: Resultados de ensayos sobre placas: Hormigón C3: Edad: 7 días**

Espesores: P1 = 19,5 cm

P2 = 19,6 cm

P3 = 19,5 cm

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	13	12	12	16	12	11	11	11	13	11	11	13	---	---	---	11	12,1	13,1
	2	11	13	13	19	10	14	15	19	11	13	10	14	13	14	15	20	14,0	
	3	19	11	14	13	10	10	10	---	10	10	12	16	14	15	18	15	13,1	

**Velocidad (km/s)**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	4,38	4,30	4,30	4,36	4,38	4,38	4,37	4,31	4,34	4,31	4,41	4,36	4,37	4,33	4,36	4,27	4,35	4,32
	2	4,36	4,34	4,45	4,40	4,44	4,29	4,36	4,38	4,38	4,30	4,37	4,41	4,38	4,33	4,32	4,34	4,36	
	3	4,30	4,30	4,27	4,18	4,20	4,22	4,16	4,30	4,30	4,21	4,31	4,26	4,30	4,29	4,19	4,38	4,26	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción
N°	kN
1	10,0
3	10,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
		cm	kN
T1 (Placa 1)	7,3	75,0	17,9
T2 (Placa 2)	7,4	78,0	18,1

Tabla N° 15: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C3: Edad: 28 días**

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	23	26	27	27	24	26	23	26	27	23	24	19	22	27	26	25	24,7	24,3
	2	24	33	24	27	26	21	26	25	22	24	23	27	27	23	23	25	25,0	
	3	24	19	20	22	19	27	27	27	30	20	23	25	23	23	23	21	23,3	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	4,50	4,45	4,44	4,53	4,47	4,49	42,8	4,50	4,56	4,50	4,49	4,60	4,57	4,64	4,55	4,62	4,53	4,54
	2	4,53	4,72	4,57	4,59	4,53	4,56	4,54	4,77	4,66	4,58	4,54	4,56	4,64	4,55	4,51	4,55	4,59	
	3	4,35	4,50	4,51	4,53	4,50	4,46	4,52	4,49	4,44	4,53	4,48	4,49	4,58	4,44	4,59	---	4,50	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción
N°	kN
1	23,0
3	28,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T1 (Placa 1)	7,3	102,0	24,4
T3 (Placa 3)	7,3	108,0	25,8

Tabla N° 16: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C3: Edad: 60 días**

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	29	27	35	28	23	24	25	29	25	27	28	25	25	24	25	30	26,8	27,7
	2	29	33	25	31	33	33	33	25	33	27	27	34	28	28	25	31	29,7	
	3	31	27	30	27	25	25	23	22	25	25	29	23	25	27	31	29	25,5	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	4,47	4,40	4,45	4,48	4,47	4,50	4,53	4,52	4,53	4,51	4,48	4,57	4,52	4,60	4,53	4,61	4,51	4,49
	2	4,49	4,56	4,55	---	4,55	4,53	---	4,52	4,56	4,55	4,51	4,55	4,59	4,57	4,58	4,51	4,54	
	3	4,41	---	4,39	4,44	4,41	4,41	4,37	4,40	4,46	4,48	4,43	4,41	4,52	4,42	---	4,40	4,42	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción
N°	kN
1	29,0
3	20,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T2 (Placa 2)	7,3	126,0	30,1
T3 (Placa 3)	7,3	119,0	28,4

Tabla N° 17: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C3: Edad: 120 días**

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	31	29	27	25	25	27	30	29	26	25	26	26	29	28	28	25	27,3	27,4
	2	24	29	24	26	31	29	28	28	31	32	26	31	25	29	30	24	27,9	
	3	30	27	27	26	25	26	30	29	29	25	25	26	27	29	25	25	26,9	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	4,58	4,56	4,63	4,62	4,60	4,57	4,52	4,59	4,57	4,57	4,55	---	4,65	4,58	4,55	4,58	4,58	4,60
	2	4,61	4,59	4,58	4,55	4,64	4,58	4,55	4,49	4,61	4,58	4,55	---	4,56	4,67	4,57	---	4,54	
	3	4,79	4,61	4,70	4,65	4,64	4,71	4,71	4,67	---	4,69	4,60	4,65	4,67	4,67	4,67	---	4,67	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción	
N°	kN	
1	26,0	34,0
2	28,0	28,5
3	23,0	28,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
		cm	kN
T1 (Placa 1)	7,0	134,0	34,8
T2 (Placa 2)	7,1	148,0	37,4
T3 (Placa 3)	7,1	146,0	36,9

Tabla N° 18: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C4: Edad: 7 días**

Espesores: P1 = 19,1 cm  
 P2 = 19,3 cm  
 P3 = 19,4 cm

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	25	16	23	19	13	24	15	21	18	20	19	22	11	13	19	21	19,3	19,9
	2	22	25	23	22	29	22	21	17	18	19	19	18	19	21	16	22	20,8	
	3	13	17	14	16	16	23	19	19	22	21	25	21	21	23	23	19	19,5	

**Velocidad (km/s)**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	4,34	4,33	4,44	4,55	4,42	4,43	4,44	4,45	4,41	4,31	4,35	4,43	4,40	4,42	4,41	4,42	4,41	4,39
	2	4,35	4,44	4,40	4,46	4,50	4,25	4,26	4,32	4,23	4,25	4,25	4,28	4,26	4,30	4,30	4,38	4,33	
	3	4,46	4,49	4,41	4,31	4,46	4,47	4,47	4,42	4,43	4,42	4,45	4,28	4,41	4,46	4,39	4,36	4,42	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción
N°	kN
2	24,0
3	19,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T1 (Placa 1)	7,3	102,0	24,4
T2 (Placa 2)	7,3	96,0	22,9

Tabla N° 19: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C4: Edad: 28 días**

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	22	25	27	23	23	27	23	19	22	22	20	22	23	25	21	21	22,9	21,1
	2	23	19	18	18	17	19	20	22	20	26	20	19	22	22	19	18	19,9	
	3	23	16	17	20	19	33	21	21	20	22	19	17	20	19	21	22	20,6	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	4,55	4,48	4,58	4,60	4,49	4,46	4,49	4,55	4,56	4,55	4,53	4,56	4,49	4,53	4,67	4,50	4,54	4,59
	2	4,55	4,60	4,56	4,60	4,54	4,51	4,53	4,62	4,67	4,51	4,53	4,56	4,52	4,50	---	4,47	4,55	
	3	4,73	4,73	4,74	4,62	4,70	4,70	4,70	4,59	4,69	4,69	4,70	4,71	4,66	4,71	4,75	---	4,69	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción
N°	kN
2	24,0
3	26,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T1 (Placa 1)	7,4	132,0	30,7
T3 (Placa 3)	7,3	125,0	29,9

Tabla N° 20: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C4: Edad: 60 días**

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	22	27	23	28	25	26	25	27	25	25	25	25	27	25	25	23	25,2	24,9
	2	22	26	23	25	25	22	23	23	25	25	25	27	21	23	27	25	24,2	
	3	27	25	26	25	25	28	27	21	21	27	27	24	26	27	24	25	25,3	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	4,62	4,56	4,61	4,61	4,50	4,46	4,57	4,55	4,56	4,59	4,53	4,58	4,54	4,45	4,60	4,50	4,55	4,56
	2	4,61	4,53	4,56	4,55	4,44	4,49	4,46	4,51	4,60	4,46	4,45	4,49	---	4,55	4,56	4,49	4,52	
	3	4,66	4,64	4,67	4,59	4,62	4,66	4,67	4,54	4,63	4,62	4,63	4,60	4,58	---	4,61	4,54	4,62	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción
N°	kN
1	21,5
3	18,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
		cm	kN
T2 (Placa 2)	7,3	144,0	34,4
T3 (Placa 3)	7,3	136,0	32,5

Tabla N° 21: Resultados de ensayos sobre placas: **Hormigón C4: Edad: 120 días**

**N° de Rebote**

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	25	25	32	32	31	28	25	26	29	31	32	30	33	31	28	29	29,2	26,6
	2	28	26	29	30	27	25	27	25	29	27	25	27	26	32	29	28	27,5	
	3	25	23	27	25	27	28	26	26	26	27	26	27	27	25	26	25	26,0	

**Velocidad** (km/s)

Hor.	Placa	UBICACIÓN																Prom.	Prom.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
C3	1	4,65	4,70	4,65	4,64	---	4,60	4,56	4,62	4,66	4,65	4,66	4,65	---	4,66	4,55	4,59	4,63	4,66
	2	4,70	4,68	4,73	---	4,74	4,72	4,46	4,58	4,62	4,58	4,58	4,63	4,65	4,58	4,60	4,65	4,63	
	3	---	---	4,79	4,77	4,83	4,73	4,70	4,70	4,74	4,77	4,71	4,63	4,72	4,72	4,74	4,70	4,73	

**CAPO Test**

Placa	Fuerza extracción	
N°	kN	
1	24,0	25,0
2	26,5	28,5
3	30,5	40,0

**Ensayo de Testigos**

Testigo	Resistencia a compresión de testigos		
	diámetro	Rotura	
	cm	kN	MPa
T1 (Placa 1)	7,1	120,0	30,3
T2 (Placa 2)	7,2	160,0	39,3
T3 (Placa 3)	7,1	142,0	35,9

## V.2.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

### V.2.1.- Valores estadísticos de los ensayos realizados

El análisis estadístico se realizó considerando una distribución de tipo Gaussiana, es decir de determinaciones independientes entre sí. El mismo involucró la determinación de los siguientes parámetros:

El *valor promedio* de los valores obtenidos, como:

$$\text{Promedio} = \bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}$$

donde: **X** es el parámetro considerado en cada caso,  
**X<sub>i</sub>** cada una de las determinaciones individuales  
**n** el número de determinaciones realizadas

La *desviación estándar de la muestra*, con la siguiente expresión:

$$\text{Desviación estándar de la muestra} = \sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum X^2 - (\sum X)^2}{n-1}}$$

La *desviación estándar de la media*:

$$\text{Desviación estándar de la media} = \sigma_n = \sqrt{\frac{\sum X^2 - (\sum X)^2}{n}}$$

Y el *coeficiente de variación*, con la siguiente expresión:

$$\text{Coeficiente de variación} = \delta = \frac{\sigma_n}{\bar{X}}$$

En las tablas siguientes se presentan los valores estadísticos para cada caso, según los resultados obtenidos de los ensayos realizados sobre probetas de 10 cm x 20 cm, 15 cm x 30 cm, y sobre las placas para cada hormigón y para cada edad de ensayo, según las expresiones mencionadas:

En las tablas siguientes, la velocidad del pulso ultrasónico, así como sus desviaciones están expresadas en **km/s**. La resistencia y sus desviaciones se expresan en **MPa**.

V.2.2.- Probetas de 10 cm x 20 cm**Tabla N° 22: Estadísticas para las determinaciones sobre probetas de 10 cm x 20 cm**

Hormigón	Edad	Ensayo	Media	$\sigma_n$	$\sigma_{n-1}$	$\delta$
<b>C1</b> H13	7	Ultrasonido	4,19	0,045	0,052	0,011
		Esclerometría	12,1	0,820	0,946	0,068
		Resistencia	9,2	0,433	0,500	0,047
	28	Ultrasonido	4,33	0,063	0,070	0,015
		Esclerometría	23,1	1,130	1,264	0,049
		Resistencia	17,3	0,898	1,003	0,052
	60	Ultrasonido	4,29	0,069	0,077	0,016
		Esclerometría	24,9	2,111	2,360	0,085
		Resistencia	18,7	0,480	0,537	0,026
	120	Ultrasonido	4,15	0,051	0,057	0,012
		Esclerometría	23,4	0,960	1,074	0,041
		Resistencia	16,6	0,828	0,926	0,050
<b>C2</b> H17	7 días	Ultrasonido	4,32	0,082	0,095	0,019
		Esclerometría	13,7	2,458	2,510	0,063
		Resistencia	13,8	1,670	1,928	0,121
	28 días	Ultrasonido	4,40	0,030	0,033	0,007
		Esclerometría	19,4	2,444	2,486	0,126
		Resistencia	21,1	1,541	1,723	0,073
	60 días	Ultrasonido	4,51	0,082	0,094	0,018
		Esclerometría	23,2	2,738	2,797	0,118
		Resistencia	25,5	3,604	4,161	0,142
	120 días	Ultrasonido	4,56	0,075	0,086	0,016
		Esclerometría	25,1	1,525	1,558	0,061
		Resistencia	29,0	2,676	3,090	0,092
<b>C3</b> H21	7 días	Ultrasonido	4,28	0,063	0,071	0,015
		Esclerometría	21,7	1,828	1,860	0,084
		Resistencia	18,0	1,135	1,269	0,063
	28 días	Ultrasonido	4,68	0,051	0,057	0,011
		Esclerometría	23,5	2,729	2,776	0,116
		Resistencia	27,2	0,528	0,590	0,019
	60 días	Ultrasonido	4,60	0,059	0,066	0,013
		Esclerometría	25,7	2,193	2,231	0,085
		Resistencia	29,1	1,340	1,498	0,046
	120 días	Ultrasonido	4,68	0,025	0,028	0,005
		Esclerometría	29,1	1,896	1,929	0,065
		Resistencia	32,6	1,093	1,222	0,034
<b>C4</b> H30	7 días	Ultrasonido	4,44	0,065	0,073	0,015
		Esclerometría	20,2	2,895	2,948	0,142
		Resistencia	24,2	1,232	1,377	0,050
	28 días	Ultrasonido	4,63	0,045	0,050	0,010
		Esclerometría	27,5	2,306	2,345	0,084
		Resistencia	30,6	1,231	1,377	0,040
	60 días	Ultrasonido	4,67	0,031	0,034	0,007
		Esclerometría	29,5	2,668	2,713	0,090
		Resistencia	33,9	1,746	1,952	0,052
	120 días	Ultrasonido	4,79	0,083	0,093	0,017
		Esclerometría	30,5	3,063	3,115	0,101
		Resistencia	41,5	3,552	3,971	0,086

V.2.3.- Probetas de 15 cm x 30 cm**Tabla N° 23: Estadísticas para las determinaciones sobre probetas de 15 cm x 30 cm**

Hormigón	Edad	Ensayo	Media	$\sigma_n$	$\sigma_{n-1}$	$\delta$
<b>C1</b> H13	7	Ultrasonido	4,09	0,041	0,050	0,010
		Esclerometría	14,3	2,509	2,557	0,175
		Resistencia	9,7	0,356	0,436	0,037
	28	Ultrasonido	4,27	0,039	0,047	0,009
		Esclerometría	24,3	3,588	3,657	0,148
		Resistencia	16,5	0,668	0,818	0,041
	60	Ultrasonido	4,35	0,029	0,036	0,007
		Esclerometría	25,2	3,425	3,490	0,136
		Resistencia	19,0	0,535	0,656	0,028
	120	Ultrasonido	4,36	0,012	0,015	0,003
		Esclerometría	26,4	2,123	2,171	0,080
		Resistencia	20,1	1,016	1,244	0,051
<b>C2</b> H17	7 días	Ultrasonido	4,25	0,074	0,081	0,017
		Esclerometría	18,0	3,480	3,513	0,193
		Resistencia	14,6	1,598	1,750	0,109
	28 días	Ultrasonido	4,42	0,035	0,036	0,008
		Esclerometría	21,8	3,040	3,055	0,139
		Resistencia	21,6	1,158	1,214	0,054
	60 días	Ultrasonido	4,50	0,036	0,039	0,008
		Esclerometría	26,4	3,151	3,181	0,120
		Resistencia	24,2	1,587	1,739	0,066
	120 días	Ultrasonido	4,49	0,112	0,123	0,025
		Esclerometría	26,3	2,622	2,647	0,100
		Resistencia	26,4	1,293	1,417	0,049
<b>C3</b> H21	7 días	Ultrasonido	4,23	0,015	0,019	0,004
		Esclerometría	17,8	2,315	2,383	0,130
		Resistencia	17,8	0,455	0,557	0,026
	28 días	Ultrasonido	4,61	0,046	0,057	0,010
		Esclerometría	25,1	2,549	2,597	0,101
		Resistencia	24,2	2,593	3,175	0,107
	60 días	Ultrasonido	4,59	0,042	0,052	0,009
		Esclerometría	27,4	1,397	1,423	0,051
		Resistencia	26,9	0,613	0,750	0,023
	120 días	Ultrasonido	4,65	0,044	0,054	0,009
		Esclerometría	29,6	2,344	2,388	0,079
		Resistencia	32,6	0,665	0,814	0,020
<b>C4</b> H30	7 días	Ultrasonido	4,49	0,017	0,021	0,004
		Esclerometría	24,7	1,886	1,940	0,076
		Resistencia	22,3	0,283	0,346	0,013
	28 días	Ultrasonido	4,66	0,057	0,069	0,012
		Esclerometría	32,6	3,947	4,022	0,121
		Resistencia	29,1	0,450	0,551	0,015
	60 días	Ultrasonido	4,61	0,022	0,027	0,005
		Esclerometría	30,4	2,684	2,735	0,088
		Resistencia	30,3	2,920	3,576	0,096
	120 días	Ultrasonido	4,71	0,036	0,044	0,008
		Esclerometría	30,6	2,111	2,151	0,069
		Resistencia	36,2	0,818	1,002	0,023

### V.2.4.- Placas

En el caso de las placas, tabla siguiente, se toma como "Resistencia", la obtenida a partir de la rotura de los testigos extraídos.

**Tabla N° 24: Estadísticas para las determinaciones sobre las placas**

Hormigón	Edad	Ensayo	Media	$\sigma_n$	$\sigma_{n-1}$	$\delta$
C1 H13	7	Ultrasonido	4,09	0,094	0,096	0,023
		Esclerometría	10,1	0,350	0,363	0,036
		Resistencia	10,4	0,000	0,000	0,000
	28	Ultrasonido	4,21	0,070	0,072	0,017
		Esclerometría	18,0	1,357	1,380	0,076
		Resistencia	16,0	0,250	0,353	0,016
	60	Ultrasonido	4,30	0,079	0,080	0,018
		Esclerometría	17,5	1,732	1,760	0,099
		Resistencia	19,3	1,100	1,556	0,057
	120	Ultrasonido	4,36	0,067	0,069	0,015
		Esclerometría	24,5	1,500	1,524	0,061
		Resistencia	25,8	0,475	0,372	0,018
C2 H17	7	Ultrasonido	4,26	0,061	0,062	0,014
		Esclerometría	12,3	1,802	1,827	0,148
		Resistencia	16,5	0,250	0,350	0,015
	28	Ultrasonido	4,36	0,073	0,074	0,017
		Esclerometría	21,0	3,670	3,710	0,175
		Resistencia	25,4	2,850	4,030	0,112
	60	Ultrasonido	4,43	0,061	0,061	0,014
		Esclerometría	23,1	2,780	2,810	0,120
		Resistencia	26,6	4,000	5,660	0,150
	120	Ultrasonido	4,45	0,041	0,050	0,009
		Esclerometría	26,4	2,730	2,750	0,103
		Resistencia	35,2	3,250	3,980	0,092
C3 H21	7	Ultrasonido	4,32	0,062	0,063	0,014
		Esclerometría	13,1	2,710	2,741	0,209
		Resistencia	18,0	0,100	0,140	0,006
	28	Ultrasonido	4,54	0,068	0,068	0,015
		Esclerometría	24,3	2,810	2,840	0,116
		Resistencia	25,1	0,700	0,990	0,028
	60	Ultrasonido	4,50	0,058	0,059	0,013
		Esclerometría	27,7	3,290	3,330	0,119
		Resistencia	29,3	0,850	1,200	0,029
	120	Ultrasonido	4,60	0,058	0,071	0,013
		Esclerometría	27,4	2,190	2,210	0,080
		Resistencia	36,4	1,110	1,360	0,030
C4 H30	7	Ultrasonido	4,39	0,084	0,085	0,019
		Esclerometría	19,9	3,530	3,570	0,178
		Resistencia	23,7	0,750	1,060	0,032
	28	Ultrasonido	4,59	0,069	0,070	0,015
		Esclerometría	21,2	3,050	3,080	0,144
		Resistencia	30,3	0,400	0,570	0,013
	60	Ultrasonido	4,56	0,062	0,063	0,010
		Esclerometría	24,9	1,840	1,860	0,074
		Resistencia	33,5	0,950	1,340	0,028
	120	Ultrasonido	4,67	0,047	0,058	0,010
		Esclerometría	27,6	2,400	2,420	0,087
		Resistencia	35,2	3,700	4,540	0,105

- Para el caso de la velocidad del pulso ultrasónico, al involucrar toda la masa del hormigón, cualquier diferencia localizada en el mismo, hace que varíe mucho el tiempo de pasaje de la onda y por lo tanto la velocidad.

Se espera por lo tanto, que el coeficiente de variación sea grande. El A.C.I. (Ref. 27) presenta valores de trabajos realizados en el Comité 228.1-89, Chapter 3, 3.2.4 (In-Placed Methods for Determination of Strength of Concrete), y con ellos se incluyen los valores obtenidos en este trabajo:

Referencia	$\bar{\delta}$ (%)
Keiller	1,1
Carrette y Malhotra	0,4
Bocca	0,7
Amín (probetas)	1,1
Amín (placas)	1,5

Se puede apreciar en esta tabla, que los valores medios del coeficiente de variación ( $\bar{\delta}$ ) están muy cerca de los obtenidos por otros investigadores y recomendados por el A.C.I.

- Para las determinaciones esclerométricas, la ASTM C805 (Ref. 26) adopta como valor promedio aceptable para la desviación estándar del ensayo el valor  $\sigma_n = 2,5$  números de rebote. Según el A.C.I. 228.1-89, Keiller (1982) llega al valor de  $\sigma_n = 3,4$  números de rebote y Carrette y Malhotra (1984) llegan al valor de  $\sigma_n = 2,4$  números de rebote. En el presente trabajo se obtuvo una desviación estándar promedio de  $\sigma_n = 2,4$  números de rebote para las probetas y  $\sigma_n = 2,5$  números de rebote para las determinaciones sobre las placas, por lo que los resultados se consideraron como aceptables. Los dos trabajos citados precedentemente, obtuvieron como media del coeficiente de variación el mismo valor:  $\bar{\delta} = 11,9 \%$ , siendo el obtenido en este trabajo  $\bar{\delta} = 10,0 \%$  para las determinaciones sobre las probetas y  $\bar{\delta} = 12,6 \%$  para las placas, o sea muy próximos a los valores citados.
- Para la resistencia a la compresión, el A.C.I. recomienda, para un control “Buena” de las tareas, un coeficiente de variación para probetas  $\bar{\delta} = 4 \%$  y para testigos  $\bar{\delta} = 5 \%$  (ACI 214-77: Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete, Chapter 3: Analysis of Strength Data, Table 3.5). En este trabajo se obtuvo, para las probetas  $\bar{\delta} = 5,5 \%$  y para los testigos  $\bar{\delta} = 4,6 \%$ , o sea cercanos a los valores recomendados.

Del análisis de los resultados obtenidos, se pudo apreciar que los mismos están dentro de los rangos de dispersión recomendados por el A.C.I., tanto en los ensayos no destructivos como en los destructivos, sobre las probetas y sobre las placas, en lo que se refiere a la repetitibilidad de los resultados de los ensayos.

### V.3.- GRÁFICOS DE LOS RESULTADOS

En las siguientes tablas se muestra un resumen de los valores de ensayos y a partir de los cuales se obtuvieron las distintas curvas que muestran las variaciones debido a la relación a/c, y a la edad, para la resistencia, velocidad del pulso ultrasónico y número de rebote, obtenidos a partir de los ensayos de las probetas.

**Tabla N ° 25: Resumen de resultados obtenidos: Edad 7 días**

Hormigón	Probeta	Velocidad	Rebote	Resistencia
		km/s		MPa
C1	10x20	4,26	11,5	9,1
		4,17	12,0	8,5
		4,14	13,5	9,3
		4,17	11,5	9,7
	15x30	4,04	14,6	9,5
		4,08	15,2	9,4
4,14		13,2	10,2	
C2	10x20	4,24	14,3	13,1
		4,45	13,3	13,9
		4,23	12,5	11,7
		4,32	14,7	16,3
	15x30	4,24	14,9	12,9
		4,20	14,7	13,4
		4,20	16,0	13,1
		4,41	22,6	17,3
		4,22	19,9	15,5
		4,23	20,0	15,4
C3	10x20	4,20	22,8	17,1
		4,27	22,3	19,1
		4,29	22,7	16,3
		4,26	20,7	18,3
		4,40	20,0	19,2
	15x30	4,25	17,9	17,3
		4,23	17,9	18,4
		4,21	17,8	17,7
C4	10x20	4,35	18,0	26,0
		4,47	20,5	22,3
		4,53	23,2	24,2
		4,48	20,2	24,9
		4,40	20,2	23,7
	15x30	4,51	24,7	22,1
		4,46	26,0	22,7
		4,49	23,3	22,1

**Tabla N ° 26: Resumen de resultados obtenidos: Edad 28 días**

Hormigón	Elemento	Velocidad	Rebote	Resistencia		
		km/s		MPa		
C1	10x20	4,22	22,8	15,8		
		4,32	22,3	17,9		
		4,35	21,8	16,8		
		4,41	23,7	18,2		
		4,36	25,0	17,9		
	15x30	4,25	21,9	15,8		
		4,32	24,7	16,3		
4,23		26,3	17,4			
C2	10x20	4,42	16,5	18,4		
		4,42	20,5	21,8		
		4,35	21,5	20,3		
		4,37	20,3	22,6		
		4,42	18,2	22,2		
	15x30	4,38	18,7	20,4		
		4,36	18,2	19,6		
		4,45	19,7	20,8		
		4,42	22,0	22,6		
		4,44	21,7	24,2		
		4,46	21,9	21,8		
		4,38	23,9	22,4		
		4,41	23,3	21,7		
		4,41	22,9	21,2		
		4,43	24,3	21,4		
		4,47	23,4	21,5		
		C3	10x20	4,74	21,7	27,3
				4,59	22,7	26,5
				4,70	23,7	28,0
4,66	23,7			27,3		
4,70	25,8			26,7		
15x30	4,67		24,7	26,0		
	4,57		26,2	26,0		
	4,59		24,6	20,5		
C4	10x20	4,62	28,5	31,2		
		4,69	28,3	30,2		
		4,69	28,0	28,5		
		4,59	28,2	32,2		
		4,59	24,5	30,9		
	15x30	4,60	33,2	28,8		
		4,64	33,6	28,7		
		4,74	30,9	29,7		

**Tabla N ° 27: Resumen de resultados obtenidos: Edad 60 días**

Hormigón	Elemento	Velocidad	Rebote	Resistencia
		km/s		MPa
C1	10x20	4,38	26,0	18,2
		4,34	26,2	18,8
		4,22	26,5	18,2
		4,31	24,8	19,1
		4,20	20,8	19,4
	15x30	4,34	23,6	18,9
		4,39	24,7	18,4
4,32		27,4	19,7	
C2	10x20	4,47	20,0	22,3
		4,49	23,7	26,5
		4,42	23,7	22,1
		4,64	25,5	30,9
	15x30	4,44	24,3	23,6
		4,52	26,6	22,2
		4,53	30,3	27,0
		4,53	25,4	25,0
		4,53	26,6	24,4
		4,47	24,9	22,7
C3	10x20	4,66	25,8	26,5
		4,53	26,3	29,9
		4,57	26,5	30,1
		4,67	25,8	29,8
		4,56	24,0	29,4
	15x30	4,53	27,6	26,9
		4,61	27,9	26,1
		4,63	26,9	27,6
C4	10x20	4,62	28,7	35,9
		4,72	30,2	33,9
		4,67	28,2	34,0
		4,66	29,7	34,9
		4,66	30,8	30,7
	15x30	4,64	31,7	27,0
		4,61	30,6	34,1
		4,59	29,0	29,8

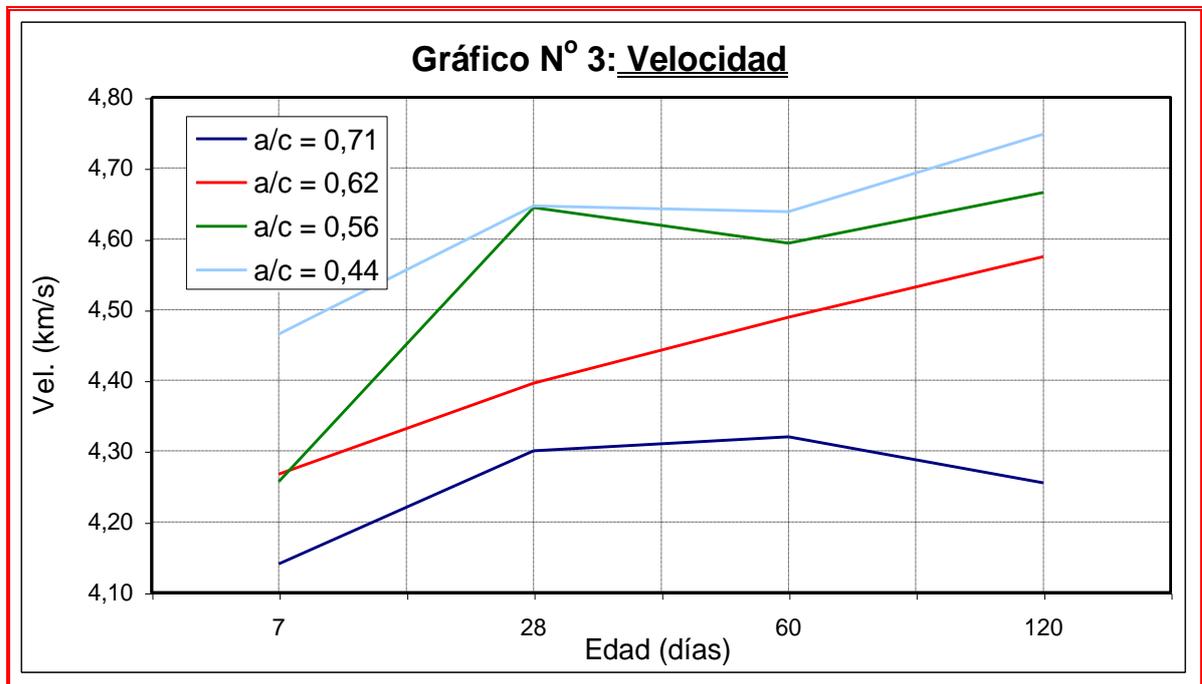
**Tabla N ° 28: Resumen de resultados obtenidos: Edad 120 días**

Hormigón	Elemento	Velocidad	Rebote	Resistencia
		km/s		MPa
C1	10x20	4,07	23,3	16,9
		4,17	25,0	17,8
		4,13	22,7	16,3
		4,18	22,2	15,3
		4,22	23,7	16,6
	15x30	4,38	26,2	19,8
		4,36	27,0	21,5
4,35		25,8	19,0	
C2	10x20	4,61	25,7	26,5
		4,55	25,5	27,3
		4,45	23,7	33,4
		4,65	25,5	28,6
	15x30	4,52	25,9	26,9
		4,61	26,7	25,9
		4,62	22,3	28,4
		4,50	28,4	25,6
		4,31	26,8	27,1
		4,40	27,7	24,3
C3	10x20	4,70	28,2	32,2
		4,68	29,5	31,7
		4,68	29,5	32,7
		4,72	29,2	34,6
		4,64	29,0	31,6
	15x30	4,61	29,2	33,5
		4,63	28,7	32,2
		4,71	31,0	32,0
C4	10x20	4,94	31,0	42,4
		4,73	27,2	37,2
		4,82	30,8	38,1
		4,71	31,8	42,9
		4,76	31,5	47,0
	15x30	4,67	30,2	35,2
		4,76	31,7	37,2
		4,69	30,1	36,1

De estas tablas obtenemos los gráficos siguientes:

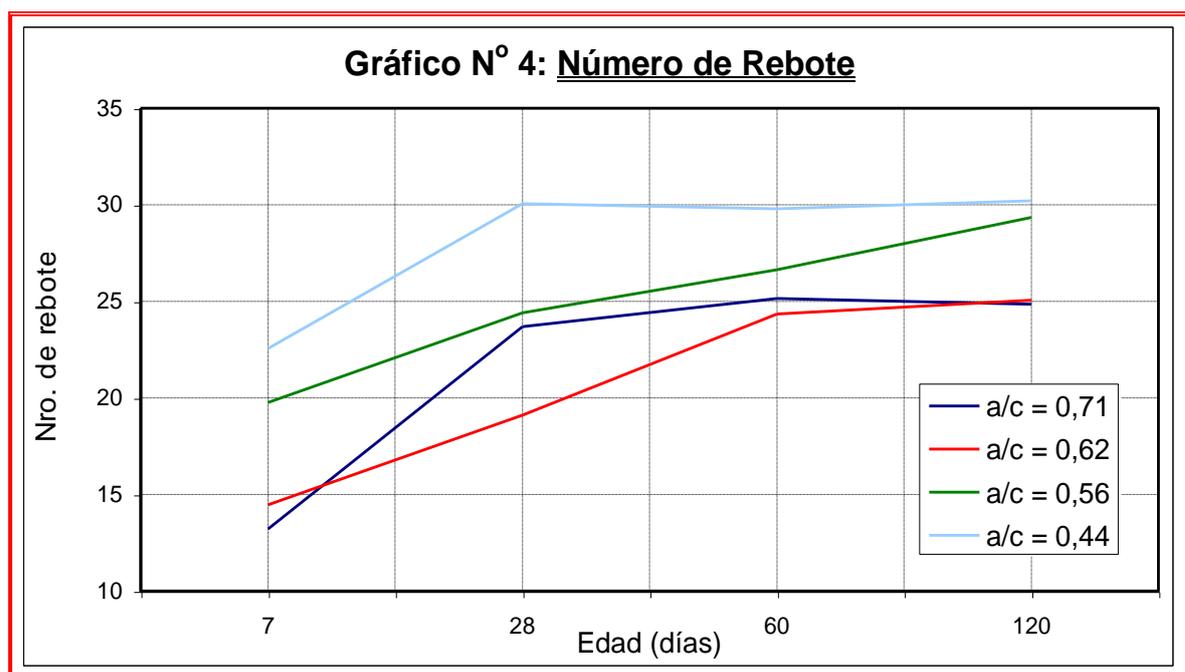
**V.3.1.- Velocidad del pulso ultrasónico para cada relación a/c en función de la edad**

(Lo graficado es el promedio de los resultados obtenidos de las probetas de 10 cm x 20 cm y de 15 cm x 30 cm)



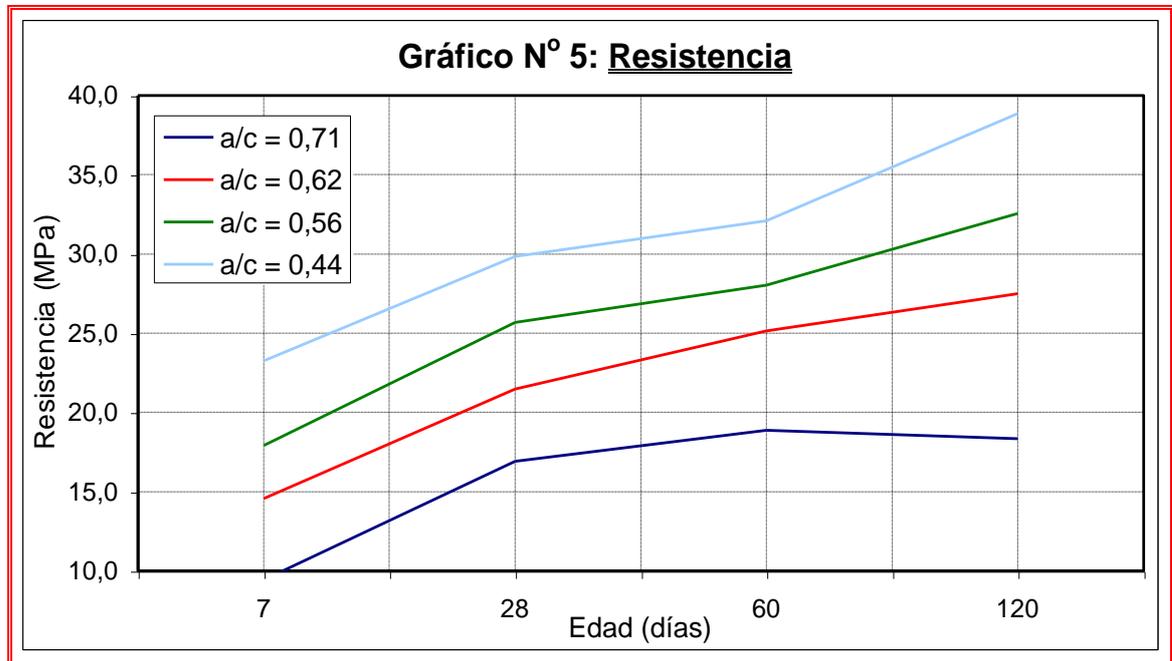
**V.3.2.- Número de rebote para cada relación a/c en función de la edad**

(Lo graficado es el promedio de los resultados obtenidos de las probetas de 10 cm x 20 cm y de 15 cm x 30 cm)



### V.3.3.- Resistencia para cada relación a/c en función de la edad

(Lo graficado es el promedio de los resultados obtenidos de las probetas de 10 cm x 20 cm y de 15 cm x 30 cm)



Se observa que, en general, para todos los ensayos, el hormigón sigue, aproximadamente, el comportamiento esperado, es decir que a menor relación a/c, así como a mayor edad, crecen la resistencia, la velocidad del pulso y el número de rebote.

La excepción a lo expresado está dada en el número de rebote para el hormigón **C1**, que resultó superior al hormigón **C2**, **Gráfico N° 4**. Y en que los resultados de los ensayos a 120 días, para ultrasonido, esclerometría y resistencia a compresión en el **C1**, fueron menores que los obtenidos para la edad de 60 días. Esto puede deberse al estado higroscópico de las probetas confeccionadas con este hormigón, al haber tenido un curado distinto que el resto de los especímenes.

Las probetas correspondientes al hormigón **C1**, como se dijo en **IV.2.1.**, fueron curadas en el ambiente del laboratorio (húmedo por la época del año en que se realizaron) y no en cámara húmeda como los restantes hormigones, por lo que su estado higrométrico varió en las distintas edades en las que se realizaron los ensayos.

### V.4.- RESULTADOS OBTENIDOS EN OBRAS DEL MEDIO

Las obras estudiadas son tres edificios en altura, dos de ellos ubicados en la ciudad de San Miguel de Tucumán, el primero, identificado como **Obra N° 1**, en Calle Chacabuco 516 y el segundo como **Obra N°2**, en Calle Marcos Paz 719, cuyas estructuras se encontraban en ejecución al momento de la realización de este trabajo. El tercero está ubicado en la ciudad de San Salvador de Jujuy, y se trata de la estructura de un edificio cuya construcción estuvo detenida por muchos años. En los primeros dos casos se llenaron probetas de hormigón con el mismo hormigón que se colaba en las obras y el curado

de las mismas se realizó en el ambiente de la obra a la par de los elementos estructurales correspondientes y del mismo modo que estos.

A los 28 días se procedió a realizar ensayos no destructivos en las estructuras y ensayos a compresión axial a las probetas.

En la estructura del edificio de San Salvador de Jujuy se realizaron determinaciones de número de rebote, ultrasonido y extracción de insertos en las losas y columnas de distintos niveles y extracción de testigos en losas.

En las tablas que siguen, se muestran también los coeficientes de variación obtenidos en cada ensayo.

#### V.4.1.- Obra N°1

Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos:

**Tabla N° 29 a: Valores obtenidos en Sub-Suelo**

Elementos Subsuelo	Posición (*)	Espesor cm	Velocidad (km/s)			Número de rebote		
			Individual	Prom.	$\delta$	Determinaciones	Prom,	$\delta$
Pie de tanque	1	15,2	4,29	4,30	0,03	16-18-17-22-19-18-19-20-19-17-20	18,6	0,09
	2	15,4	4,45					
	3	15,4	4,16					
Tabique	1	14,8	4,15	4,20	0,02	22-20-17-22-18-18	19,5	0,11
	2	15,1	4,24					
Columna contrafrente	1	20,3	4,48	4,26	0,05	24-20-20-24	22,0	0,12
	2	20,5	4,08			26-24-23-22	23,8	
	3	20,3	4,23			28-28-21-26	25,8	
Columna Centro	1	24,8	4,31	4,22	0,04	30-28-26-28	28,0	0,09
	2	25,1	4,34			23-28-28-32	27,8	
	3	25,0	4,00			28-24-28-25	26,3	
Columna Frente	1	20,0	4,63	4,24	0,07	26-25-28-26	26,3	0,07
	2	20,1	4,19			28-24-26-29	26,7	
	3	19,8	4,37			26-25-26-28	26,3	
	1'	79,8	4,11			25-27-24-32	27,0	
	2'	79,7	3,90			28-26-26-27	26,7	

(\*) La posición se refiere a la altura del elemento estructural donde se realizaron las determinaciones (para obtener la velocidad del pulso se realizó una determinación del tiempo de pasaje del pulso en cada posición):

- 1: parte superior del elemento
- 2: zona media
- 3: zona inferior

Los resultados de ensayo a la compresión simple de las probetas se presenta a continuación:

**Tabla N° 29 b: Resultados de ensayos de probetas de Sub-Suelo**

Prob. N°	Resistencia a compresión (MPa)		
	Individual	Prom.	$\delta$
1	13,9	13,6	0,09
2	12,2		
3	14,7		

**Tabla N° 30 a: Resultados de ensayos en Planta Baja**

Elementos Planta Baja	Pos.	Espesor cm	Velocidad (km/s)			Número de rebote		
			Individual	Prom.	$\delta$	Determinaciones	Prom.	$\delta$
Tabique	1	15,0	3,99	3,97	0,005	14-18-15	15,7	0,166
	2	15,0	3,98			18-20-21	19,7	
	3	15,0	3,95			23-23-20	22,0	
Columna Contrafrente	1	20,5	4,14	4,21	0,015	22-28-24-24-30-26	25,7	0,120
	2	20,2	4,27			24-24-21-25-26-27	24,5	
	3	20,0	4,21			26-28-18-23-28-22	24,2	
Columna Centro	1	25,5	4,40	4,15	0,042	25-28-26-30-22-23	25,7	0,117
	2	25,5	4,20			26-23-25-25-25-23	24,5	
	3	25,5	4,20			28-22-28-27-20-28	25,5	
	2'	80,0	4,01			21-28-22	23,7	
	3'	79,8	3,96			28-20-23	23,7	
Columna Frente	1	19,8	4,10	4,19	0,031	33-27-30-30-26-31	29,5	0,157
	2	20,0	4,38			32-31-27-31-37-26	29,2	
	3	19,8	4,19			32-25-28-38-35-28	31,0	
	2'	69,7	4,23			25-26-23	24,7	
	3'	70,2	4,04			22-23-22	22,3	
Columna N frente	1	69,5	4,61	4,74	0,037	20-19-24-24-25-23	22,5	0,108
	2	69,3	4,86			24-24-29-26-25-25	25,5	

**Tabla N° 30 b: Resultados de ensayos sobre probetas P.B.**

Prob. N°	Resistencia a compresión (MPa)		
	Individual	Prom.	$\delta$
4	23,2	18,2	0,242
5	14,9		
6	16,5		

**Tabla N° 31 a: Resultados de ensayos en 1er. Piso**

Elementos 1er. piso	Espesor cm	Velocidad (km/s)			Número de rebote			
		Individual	Promedio	$\delta$	Posición 1	Posición 2	Prom	$\delta$
Viga 1	15,6	4,11	4,14	0,010	28-29-27	25-25-24	26,0	0,054
	15,8	4,17			25-26-25	26-26-26		
Viga 2	30,8	4,17	4,25	0,025	27-28-25	27-27-27	26,1	0,045
	30,8	4,32			25-24-26	26-26-25		
Tabique escalera	15,4	4,70	4,45	0,049	32-24-26	28-32-26	27,3	0,106
	15,8	4,33			24-26-30	27-30-27		
	15,6	4,31			23-28-24	32-25-28		

**Tabla N° 31 b: Resultados de ensayos sobre probetas**

Prob. N°	Resistencia a compresión (MPa)		
	Individual	Prom.	$\delta$
7	17,0	22,7	0,379
8	18,9		
9	22,8		
10	19,7		
11	19,5		
12	20,9		
13	17,8		
14	31,1		
15	31,2		
16	25,5		
17	25,5		

**V.4.2.- Obra: N°2**

En esta obra se ensayaron dos elementos estructurales del Sub-Suelo, puesto que eran elementos muy armados y particularmente difíciles para el colado y compactado del hormigón. Los resultados de los ensayos realizados a los 28 días son los siguientes:

**Tabla N° 32 a: Valores obtenidos en Obra N° 2**

Elemento	Velocidad (km/s)			N° de Rebote		
	Individual	Prom.	$\delta$	Determinaciones	Prom.	$\delta$
Tabique	4,17	4,13	0,048	25-28-23-24-28	22,4	0,117
	3,96			18-22-24-18-19		
	3,91			20-17-22-22-24		
	4,03			22-25-20-18-20		
	3,98			23-22-25-24-19		
	4,20			21-21-23-22-20		
	4,26			25-24-23-26-22		
	4,51			24-19-21-26-23		
Columna	3,94	4,18	0,052	20-22-20-26-24	21,6	0,884
	4,37			19-22-22-24-20		
	4,22			21-21-23-19-21		

**Tabla N° 32 b: Resultados de ensayos sobre probetas**

Probeta N°	Resistencia a compresión (MPa)		
	Individual	Prom.	$\delta$
1	19,6	21,1	0,057
2	20,1		
3	22,2		
4	21,4		
5	22,2		

V.4.3.- Obra: N°3V.4.3.1.- Resultados de ensayos sobre las losasTabla N° 33: Resultados de ensayos sobre las losas

Nivel	Velocidad ultrasónica		Número de Rebote	CAPO Test kN	Testigos		
	e (cm)	km/s			Diám.	Altura	Rotura MPa
P.B.	9,7	4,33	40,3	30,5	7,2	9,7	51,6
1er. ENTR.	---	---	36,4	---	---	---	---
2do. ENTR.	---	---	41,1	20,0	7,2	9,7	52,2
PISO 1	---	---	47,6	25,0	7,2	10,1	34,4
PISO 2	12,4	3,90	28,6	12,5	7,2	12,4	24,7
PISO 3	9,7	3,94	31,6	18,5	7,2	9,7	29,5
PISO 4	---	---	24,9	10,0	---	---	---
PISO 5	10,3	4,19	30,8	11,0	7,2	10,3	36,4
PISO 6	11,4	4,19	33,3	---	7,2	11,4	23,6
PISO 7	10,1	3,77	32,6	13,0	7,2	10,1	20,9
PISO 8	11,4	4,01	34,8	13,5	7,2	11,4	33,9
PISO 9	11,9	4,25	33,0	13,5	7,2	11,9	23,3
PISO 10 (a)	11,6	4,44	33,3	10,0	7,2	11,6	28,7
PISO 10 (b)	---	---	30,1	9,0	7,2	12,8	27,3
TERRAZA	---	---	27,1	---	---	---	---

**Nota (1):** los testigos fueron extraídos uno por nivel, tomando una losa representativa. En el valor de resistencia consignado, se ha tenido en cuenta la corrección debido al factor h/d (altura/diámetro).

**Nota (2):** en la misma losa elegida para la extracción de los testigos, se realizó una grilla ortogonal de 16 puntos y de 5 cm de lado, en la cual se realizaron los impactos con el esclerómetro. Se consigna el promedio.

**Nota (3):** las velocidades del pulso ultrasónico fueron tomados en las mismas losas, aprovechando el hueco dejado por el testigo para medir el espesor de la losa y poder colocar los transductores.

**Nota (4):** los insertos fueron extraídos de las mismas losas y uno por nivel.

V.4.3.2.- Resultados de ensayos sobre las columnas

**Nota (1):** la velocidad del pulso en cada columna fue determinada en la mitad de la altura de la misma.

**Nota (2):** el número de rebote corresponde al promedio de 16 determinaciones realizadas sobre una grilla ortogonal, similar a la de las losas, de 5 cm de lado.

**Nota (3):** el valor de la fuerza de extracción que se consigna, corresponde al promedio de dos determinaciones realizadas en cada columna.

**Tabla N° 34: Resultados de ensayos sobre columnas**

Nivel	C20			C26			C5		
	v	N	F	v	N	F	v	N	F
	km/s		kN	km/s		kN	km/s		kN
PB	2.96	30.6	---	4.22	51.1	35.2	4.12	56.8	31.5
Ent.	4.15	46.3	---	4.20	52.4	---	3.94	50.1	---
3	3.86	49.6	22.0	3.59	39.8	14.5	3.75	48.5	19.0
4	3.94	51.4		---	47.9	---	3.85	40.4	---
6	3.76	43.4	16.2	---	37.8	19.0	3.99	42.9	15.2
8	3.97	50.4		---	48.5	--	4.02	53.8	---
9	3.72	48.6	19.7	4.22	50.8	21.7	4.10	43.3	17.7
10	4.26	41.2	---	---	52.6	---	4.26	54.4	---

Nivel	C6			C24			C9		
	v	N	F	v	N	F	v	N	F
	km/s		kN	km/s		kN	km/s		kN
PB	---	50.4	32.0	4.02	46.7	21.5	3.88	49.0	25.2
Ent.	3.79	50.5	---	4.12	54.8	---	4.14	53.6	---
3	3.68	50.7	23.5	3.62	44.5	20.0	3.73	42.9	18.2
4	3.81	48.9	---	4.01	47.4	---	4.24	48.7	---
6	3.61	37.2	17.0	4.29	49.6	20.0	3.76	42.7	15.2
8	4.00	47.6	---	3.76	47.0	---	4.03	51.4	---
9	4.06	40.7	16.7	3.87	43.0	22.2	4.15	51.0	18.7
10	4.09	48.2	---	3.82	50.1	---	4.29	49.0	---

**V.4.4.- Trabajos en el Laboratorio de Ensayo de Materiales – U.N.T.**

Aprovechando los ensayos de rutina, que cotidianamente se realizan en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, a una serie de probetas normalizadas de hormigón, confeccionadas con materiales de la región, para la verificación de la resistencia del hormigón colocado en una estructura que se construye en el medio, de 28 días de edad, se les realizaron a cada una, previa a la rotura por compresión, ensayos de determinación de la velocidad del pulso ultrasónico, luego, colocadas en la prensa y con una carga de 10 t., se determinó el número de rebote, procediendo como en los casos anteriores a realizar las lecturas en tres alturas y en cada caso tres determinaciones a 120°, para sacar el promedio. La tabla así lograda, se transcribe a continuación, y estos valores se utilizaron también para la verificación de las expresiones de correlación que se obtuvieron:

**Tabla N° 35: Valores de ensayos en el Laboratorio de Ensayo de Materiales – U.N.T.**

Probeta	Velocidad	Rebote			Resistencia
N°	km/s	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	MPa
1	4,67	15-24-28	32-31-30	31-30-24	32,1
2	4,72	24-24-24	32-26-24	28-23-28	34,7
3	4,61	29-27-23	30-24-22	24-25-26	31,5
4	4,69	28-27-30	28-29-29	27-26-27	30,2
5	4,67	32-24-22	26-28-28	30-28-27	33,9
6	4,69	24-22-25	28-26-26	32-26-25	31,6
7	4,56	28-32-33	28-34-34	28-28-26	34,5
8	4,65	26-35-32	29-26-27	25-26-26	34,2
9	4,58	31-30-28	28-25-27	28-26-24	31,5
10	4,77	24-23-22	30-22-22	25-22-24	30,5
11	4,69	28-25-25	24-24-23	26-25-23	28,9
12	4,74	26-24-32	22-26-24	24-28-30	31,7
Promedios	4,67	26,9			32,1
$\delta$	0,013	0,123			0,058

## **CAPÍTULO VI**

### **ANÁLISIS DE REGRESIÓN**

## VI.1.- ANÁLISIS DE REGRESIÓN

### VI.1.1.- Curvas de Correlación

Las curvas de correlación se realizaron usando el programa Excel de Microsoft Office. Este programa utiliza el método de los “mínimos cuadrados”, para la determinación de los coeficientes de las ecuaciones y del coeficiente de correlación. Las fórmulas empleadas son las siguientes:

- 1.- Regresión lineal:  $y = mx + b$
- 2.- Regresión potencial:  $y = ax^c$
- 3.- Regresión exponencial:  $y = ae^{cx}$
- 4.- Regresión logarítmica:  $y = c \ln x + b$

En el caso de la regresión lineal los coeficientes resultan:

$$m = \frac{n\sum x.y - \sum x\sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y\sum x^2 - \sum x\sum x.y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

siendo el coeficiente de correlación:

$$r = \frac{n\sum x.y - \sum x\sum y}{\sqrt{(n\sum x^2 - (\sum x)^2)(n\sum y^2 - (\sum y)^2)}}$$

En el caso de las otras correlaciones, para obtener los coeficientes se debe linealizar, hacer un cambio de variables y entonces los coeficientes se calculan de forma similar. Por ejemplo, para el caso de una regresión potencial:

la expresión es:  $y = ax^c$

aplicando logaritmos neperianos:  $\ln y = \ln a + c \ln x$

y los coeficientes se calculan:  $c = \frac{n\sum \ln x \cdot \ln y - \sum \ln x \sum \ln y}{n\sum (\ln x)^2 - (\sum \ln x)^2}$

$$y \quad b = \frac{\sum \ln y \sum (\ln x)^2 - \sum \ln x \sum \ln x \cdot \ln y}{n \sum (\ln x)^2 - (\sum \ln x)^2}$$

de donde resulta entonces:  $a = e^b$

Se correlacionaron los resultados de los ensayos de velocidad del pulso ultrasónico y del número de rebote en las probetas con la resistencia a compresión de las mismas, siguiendo los lineamientos de las normas IRAM N° 1683 (Ref. 22) y N° 1694 (Ref. 23) y A.C.I. 228.1-89, Ch. 2, 2.1 (Ref. 27), realizando el promedio de los valores de las probetas de 10 cm x 20 cm y las de 15 cm x 30 cm, obtenidos en el ensayo de compresión de las mismas, primero en forma individual con cada ensayo y luego con la combinación de ambos métodos para cada edad del hormigón.

Luego se realizó la correlación sin tener en cuenta la edad a la que se obtuvieron los valores, para comprobar si mejora o no el coeficiente de correlación. Igual que en el caso anterior se hizo la correlación, para cada ensayo en forma individual y luego para la combinación de ambos ensayos.

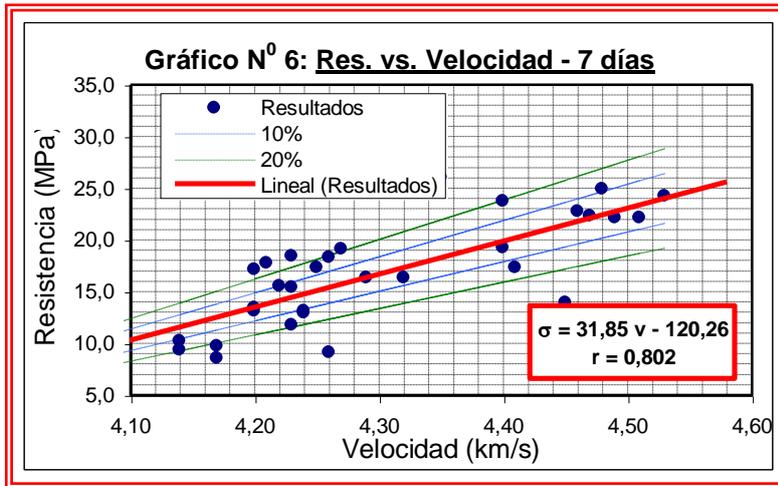
En los **Gráficos N° 6 a 19** se muestran los valores que se obtuvieron, la *línea de tendencia* con su expresión y su respectivo *coeficiente de correlación*. La curva que se presenta en cada gráfico es la que tiene el coeficiente más alto, es decir el más próximo al valor 1. En estas curvas, también se muestran las curvas que se apartan en más o menos 10 % y 20 % de la línea de tendencia.

En los **Gráficos N° 8, 11, 14, 17 y 20** se presentan las curvas obtenidas a partir de las expresiones de correlación para los ensayos combinados, para cada edad, para distintos valores del número de rebote.

Para calcular las expresiones se tomaron los resultados de los ensayos realizados, volcados en las **Tablas N° 25, 26, 27 y 28** que se encuentran en el **Capítulo V**.

**VI.1.2.- Correlación para “7 días”**

**VI.1.2.1.- Resistencia vs. Velocidad del pulso ultrasónico**

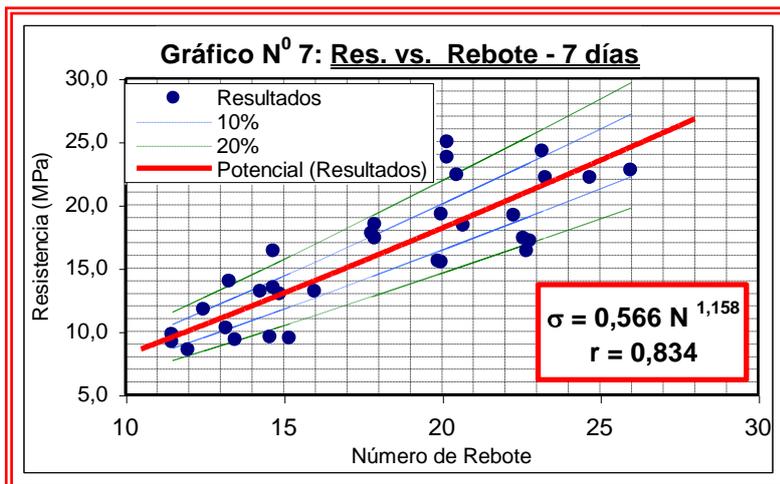


Se puede observar que en este caso, los resultados se encuentran dentro de un error, respecto de la línea de tendencia, del:

- 10 % el 42 %
- 20 % el 72 %

el resto fuera de estos valores

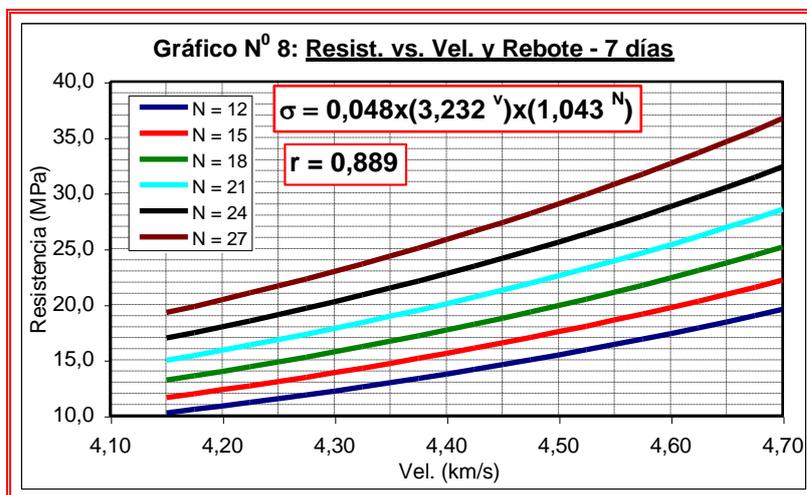
**VI.1.2.2.- Resistencia vs. Número de rebote**



En este caso los resultados se encuentran, de la línea de correlación, a un:

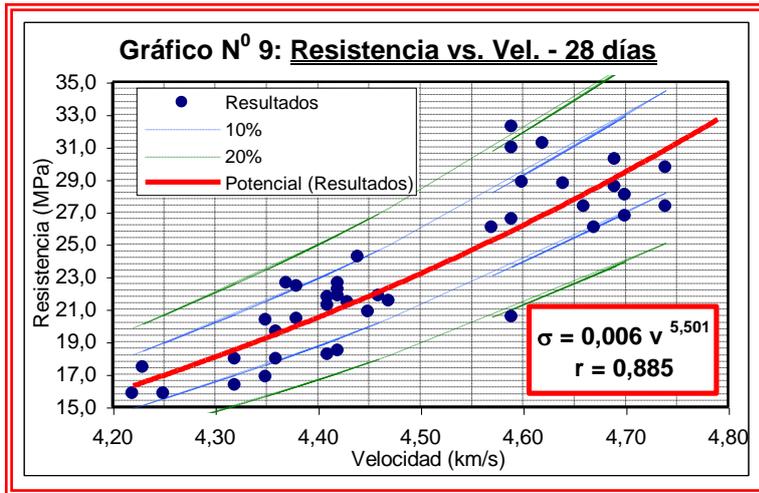
- 10 % el 52 %
- 20 % el 82 %

**VI.1.2.3.- Resistencia vs. Velocidad del pulso y Número de rebote**



**VI.1.3.- Correlación para “28 días”**

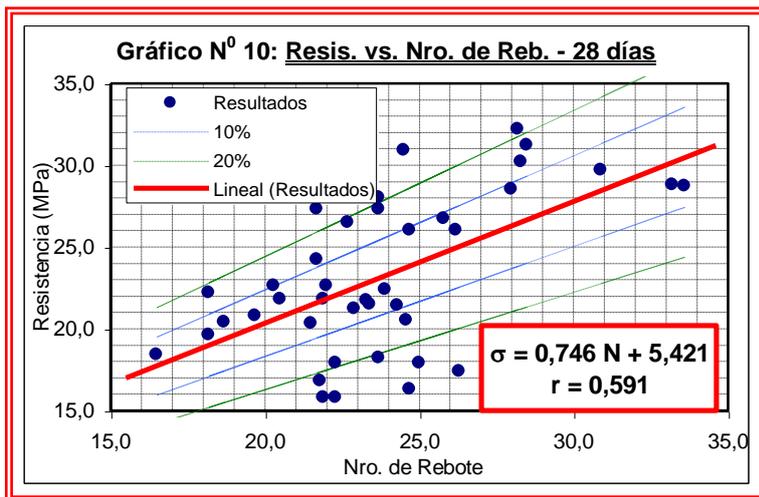
**VI.1.3.1.- Resistencia vs. Velocidad del pulso ultrasónico**



En este caso los resultados experimentales se encuentran, de la línea de tendencia, con una diferencia de:

- 10 % el 70 %
- 20 % el 95 %

**VI.1.3.2.- Resistencia vs. Número de Rebote**

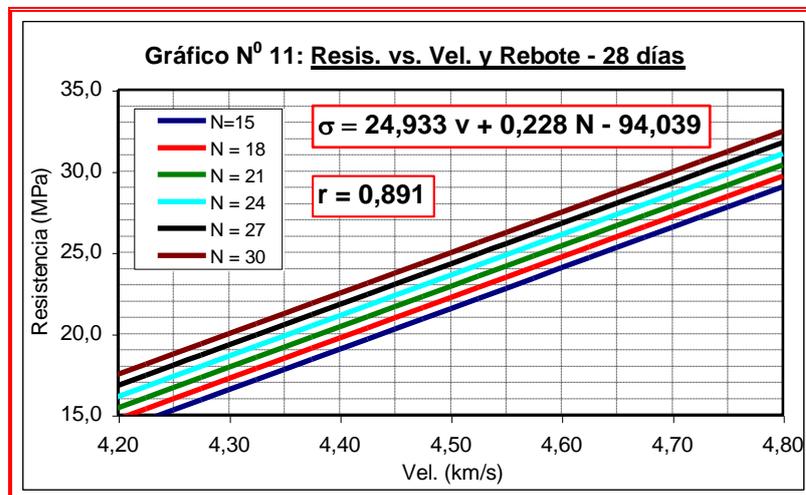


Para la esclerometría a 28 días resulta a:

- 10 % el 53 %
- 20 % el 73 %

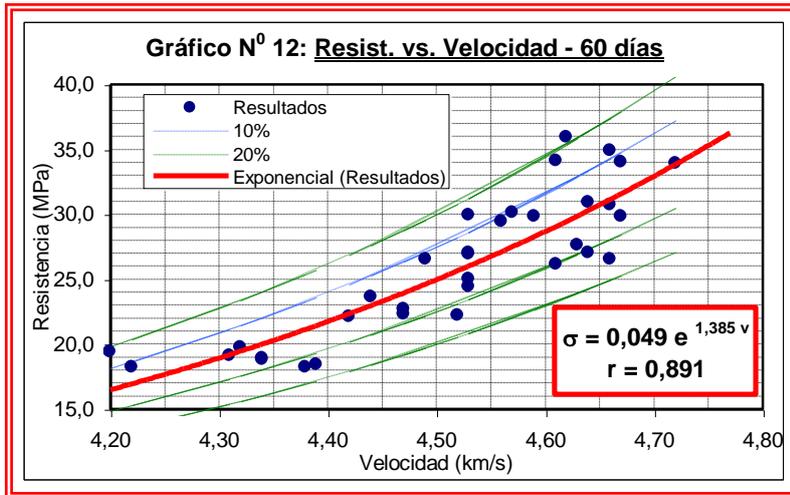
de los resultados.

**VI.1.3.3.- Resistencia vs. Velocidad del pulso y Número de Rebote**



**VI.1.4.- Correlación para “60 días”**

**VI.1.4.1.- Resistencia vs. Velocidad del pulso ultrasónico**

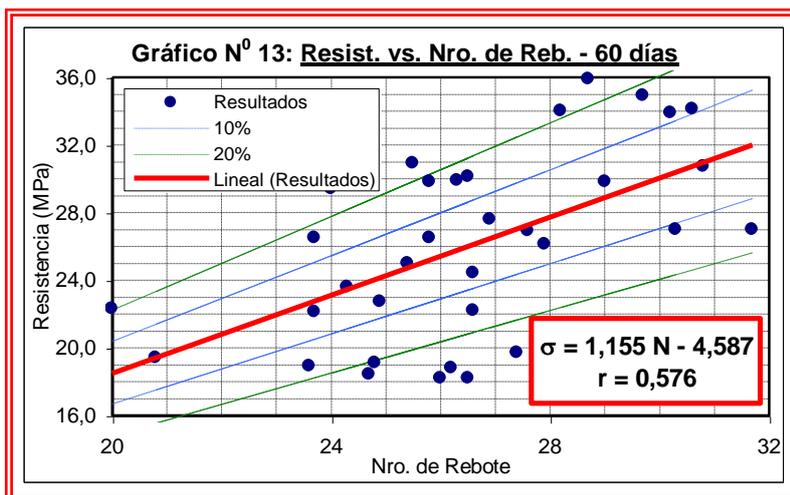


Los resultados se encuentran a:

- 10 % el 75 %
- 20 % el 99 %

de la curva de correlación obtenida.

**VI.1.4.2.- Resistencia vs. Número de Rebote**

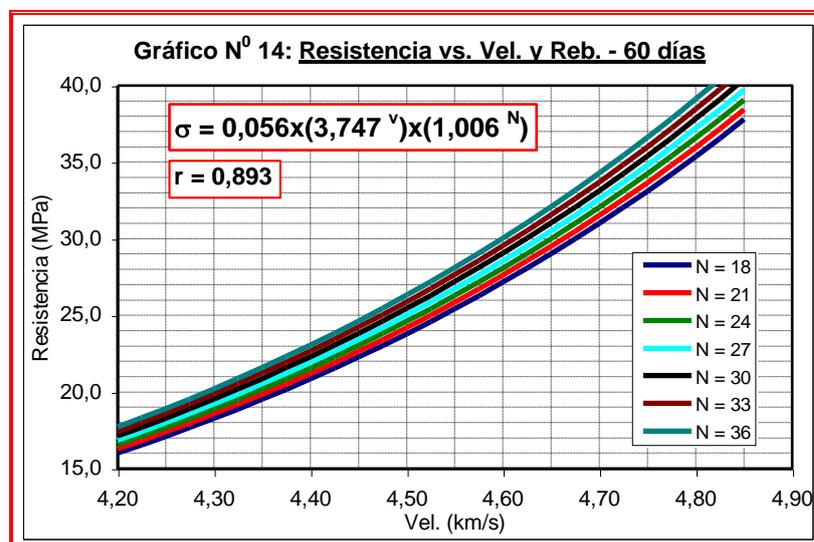


Para esclerometría, los resultados se encuentran a:

- 10 % el 35 %
- 20 % el 73 %

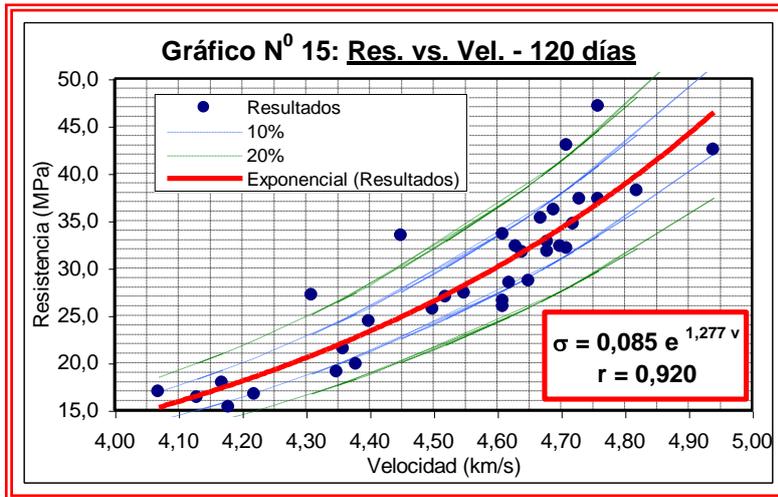
de la curva de correlación.

**VI.1.4.3.- Resistencia vs. Velocidad del pulso ultrasónico y Número de rebote**



**VI.1.5.- Correlación para “120 días”**

**VI.1.5.1.- Resistencia vs. Velocidad del pulso ultrasónico**

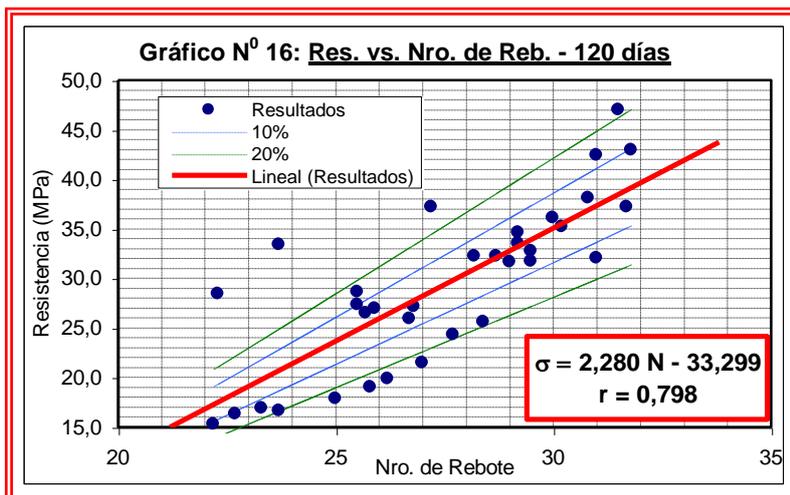


En este caso los resultados se encuentran a:

- 10 % el 74 %
- 20 % el 89 %

de la curva de correlación.

**VI.1.5.2.- Resistencia vs. Número de rebote**

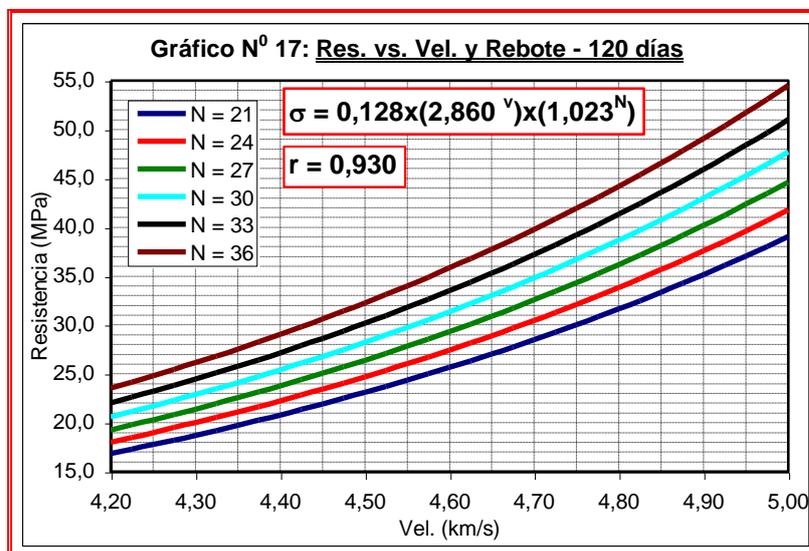


Para el número de rebote, los resultados se encuentran a:

- 10 % el 56 %
- 20 % el 77 %

de la curva de correlación obtenida.

**VI.1.5.3.- Resistencia vs. Velocidad del pulso ultrasónico y Número de rebote**



Se puede apreciar que la correlación no es la misma para cada tipo de ensayo, e incluso que para un mismo tipo de ensayo varía con la edad del hormigón ensayado. También se observa que el coeficiente de correlación aumenta cuando se realiza la correlación entre la resistencia a compresión del hormigón con la combinación de los ensayos de número de rebote y ultrasonido, lo cual implica que la expresión de correlación que mejor permite estimar la resistencia es la lograda con la combinación de ambos ensayos.

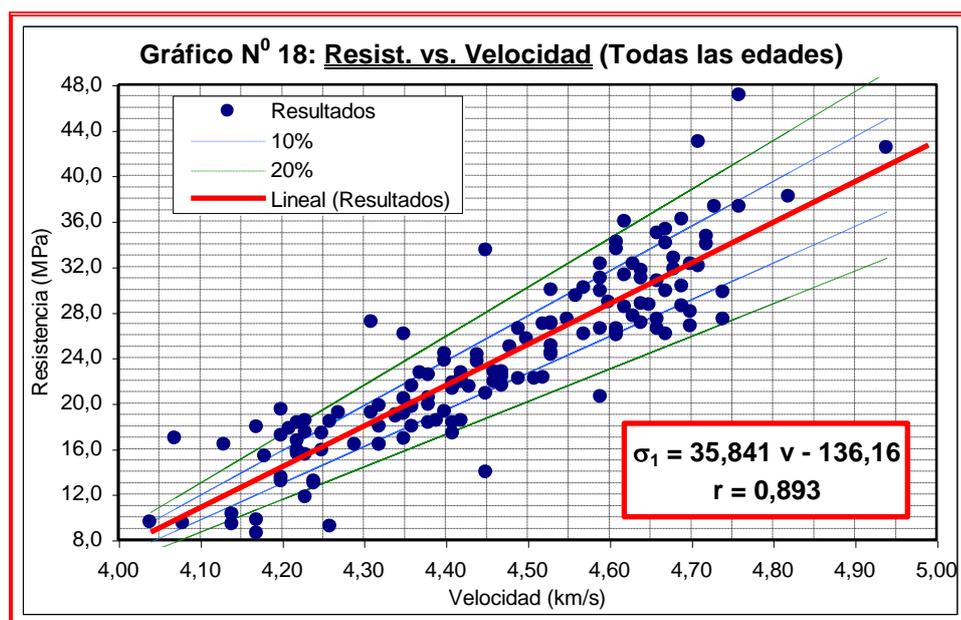
En cada caso se presentan las curvas que se alejan de la de correlación en  $\pm 10\%$  y en  $\pm 20\%$  del valor de la resistencia estimada mediante ésta y el porcentaje de resultados obtenidos, dentro de cada ámbito. Se aprecia que para la velocidad del pulso, con su correspondiente resistencia (obtenidas a partir de los ensayos sobre las probetas) se acercan mucho más a la curva de correlación obtenida. No sucede lo mismo con el número de rebote.

Se intentó entonces, en un análisis posterior, correlacionar la totalidad de los valores, sin tener en cuenta la edad de los hormigones a la que se realizaron los ensayos, para tratar de conseguir expresiones que estimen mejor la resistencia a la compresión del hormigón.

### VI.1.6.- Correlación para todas las edades

Siguiendo los mismos pasos que para la correlación a cada edad de los hormigones, se lograron los siguientes gráficos y expresiones, con un total de 141 resultados de ensayos. Se representan en los dos primeros gráficos, los pares de valores obtenidos ( $\sigma, v$ ) y ( $\sigma, N$ ), a partir de los ensayos sobre las probetas. En primer lugar se obtuvo  $v$  y  $N$  y luego, al romperlas, el valor de la resistencia a compresión. Con estos valores se buscó la línea de tendencia con mejor coeficiente de regresión. También se presentan las curvas que se apartan  $\pm 10\%$  y  $\pm 20\%$  de la de correlación. En el último gráfico se presentan la expresión de correlación obtenida combinando ambos métodos.

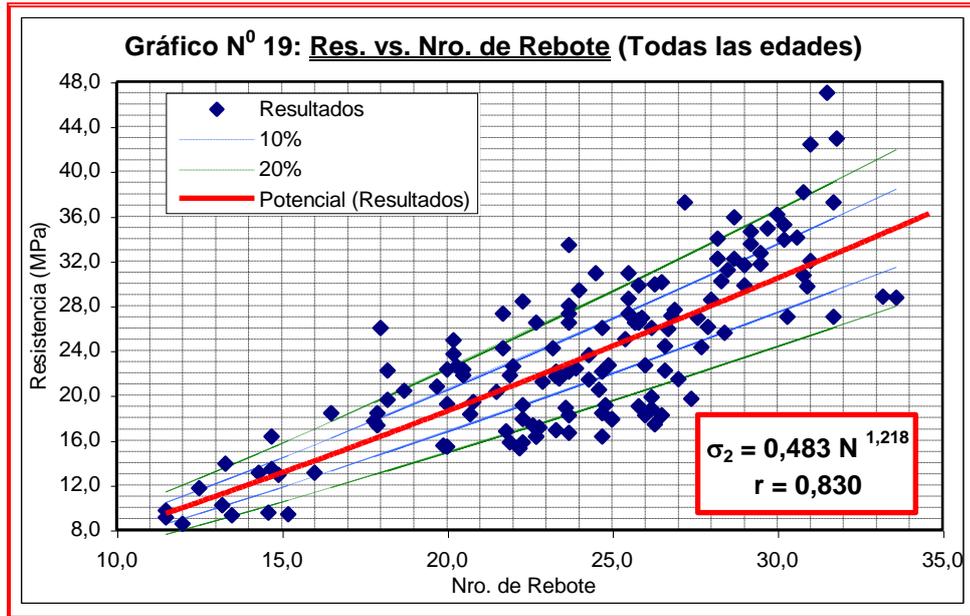
#### VI.1.6.1.- Velocidad del pulso ultrasónico



Los resultados están, de la línea de correlación obtenida:

- a 10 % el 61 % y
- a 20 % el 86 %.

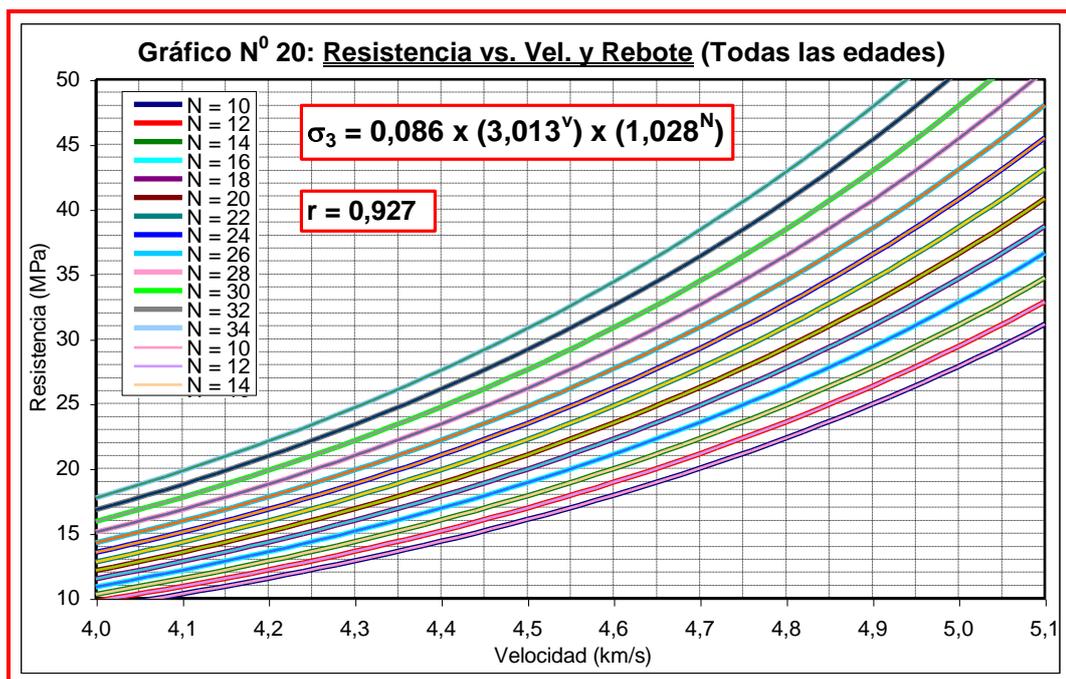
**VI.1.6.2.- Número de rebote**



En este caso los resultados están a: • a 10 % el 40 % y • a 20 % el 73 %.

Al considerar todos los valores, sin distinciones de edades del hormigón, se puede apreciar que los coeficientes de correlación mejoran sensiblemente para el ensayo de esclerometría y se mantiene aproximadamente estable para el ensayo de ultrasonido. Se considera que al no tener en cuenta la edad del hormigón, las expresiones de correlación obtenidas representarán mejor al hormigón colocado en obra, y por lo tanto estas expresiones se pueden considerar como las **Expresiones de Correlación** entre la resistencia del hormigón con la velocidad del pulso ultrasónico y el número de rebote, tomadas independientemente.

**VI.1.6.3.- Velocidad del pulso ultrasónico y Número de rebote**



Se puede apreciar en el **Gráfico N° 20** que se logró una mejora sensible del coeficiente de correlación respecto a los obtenidos mediante los métodos considerados individualmente, y respecto a los obtenidos en los ensayos para cada edad de los hormigones. Por este motivo se adoptó esta expresión para estimar la resistencia a compresión del hormigón a partir de la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico y el número de rebote en el hormigón estudiado.

## VI.2.- EXPRESIONES FINALES

### VI.2.1.- Resistencia con Velocidad del pulso:

Expresión N° 1                       $\sigma'_1 = 35,841 \cdot v - 136,16$                        $r = 0,893$

### VI.2.2.- Resistencia con Número de rebote:

Expresión N° 2                       $\sigma'_2 = 0,483 \cdot N^{1,218}$                        $r = 0,830$

### VI.2.3.- Resistencia con Velocidad del pulso y número de rebote como parámetro:

Expresión N° 3                       $\sigma'_3 = 0,086 \cdot [(3,013^v) \cdot (1,028^N)]$                        $r = 0,927$

## VI.3.- VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

### VI.3.1.- Verificación en elementos fabricados en Laboratorio

A continuación se verificaron las **Expresiones N° 1, N° 2 y N° 3** aplicándolas a los elementos estructurales ejecutados en el Laboratorio, o sea las placas; se reemplazó en las expresiones los resultados de los ensayos no destructivos realizados sobre ellas, para estimar la resistencia, comparándola con la resistencia obtenida en el ensayo a compresión simple de los testigos extraídos de las placas.

En la **Tabla N° 36** se vuelcan los siguientes valores:

- Columna N° 1.-** Tipo de hormigón
- Columna N° 2.-** Edad del hormigón
- Columna N° 3.-** Velocidad del pulso ultrasónico, promedio de 16 determinaciones en cada placa y a cada edad.
- Columna N° 4.-** Número de rebote, promedio de 48 determinaciones en cada placa y a cada edad.
- Columna N° 5.-** Estimación de la resistencia con el valor promedio de la velocidad del pulso ultrasónico reemplazado en la **Expresión N° 1**
- Columna N° 6.-** Estimación de la resistencia con el valor promedio del número de rebote reemplazado en la **Expresión N° 2**
- Columna N° 7.-** Estimación de la resistencia con los valores promedios de la velocidad del pulso ultrasónico y del número de rebote en la **Expresión N° 3**
- Columna N° 8.-** Resistencia a la compresión promedio, obtenida en los ensayos a la compresión de los testigos extraídos de las placas.
- Columnas N° 9, N° 10 y N° 11.-** En éstas se vuelcan las diferencias, en por ciento, que se tienen entre la resistencia a la compresión de los testigos y las resistencias estimadas con cada expresión, utilizando la siguiente fórmula:

$$Dif (\%) = \frac{\sigma'_i - \sigma'_{Testigo}}{\sigma'_{Testigo}} \times 100,$$

donde  $\sigma_i$  es la resistencia estimada con la **Expresión N° i**, con  $i = 1, 2$  y  $3$

Tabla N° 36

**Verificación de los resultados obtenidos sobre elementos fabricados en el Laboratorio  
con las expresiones N° 1, N° 2 y N° 3,**

Hormigón	Edad	Velocidad	Número rebote	Resistencia a Compresión Estimada (MPa)			$\sigma_{\text{Testigos}}$ MPa	Diferencias		
	días	km/s		$\sigma'_1$ (Vel.)	$\sigma'_2$ (Reb.)	$\sigma'_3$ (Comb.)		% ( $\sigma'_1$ )	% ( $\sigma'_2$ )	% ( $\sigma'_3$ )
Col. N° 1	Col. N° 2	Col. N° 3	Col. N° 4	Col. N° 5	Col. N° 6	Col. N° 7	Col. N° 8	Col. N° 9	Col. N° 10	Col. N° 11
C1	7	4,09	10,1	10,4	6,6	9,8	10,4	0,3	-22,3	-1,5
	28	4,21	18,0	14,7	16,3	14,5	16,0	-7,6	2,4	-9,2
	60	4,30	17,5	18,0	15,8	15,8	19,3	-7,0	-18,3	-18,2
	120	4,36	24,6	20,1	23,8	20,4	25,8	-22,1	-7,5	-20,8
C2	7	4,26	12,3	16,7	9,3	12,8	16,5	1,3	-37,6	-19,9
	28	4,36	20,6	20,1	19,2	18,3	25,4	-20,7	-24,1	-27,7
	60	4,43	23,1	22,7	22,1	21,3	26,6	-14,6	-16,8	-20,0
	120	4,45	25,8	23,4	25,3	23,0	35,2	-33,5	-28,2	-33,6
C3	7	4,32	13,1	18,8	10,8	13,26	18,0	4,5	-38,4	-20,1
	28	4,54	24,3	26,5	23,5	24,7	25,1	5,5	-6,3	-1,7
	60	4,50	27,7	25,0	27,6	25,8	29,3	-14,7	-5,6	-11,8
	120	4,60	27,4	28,5	27,2	28,6	36,4	-21,5	-25,1	-21,4
C4	7	4,39	19,9	21,0	18,5	18,5	23,7	-11,2	-22,0	-21,8
	28	4,59	21,1	28,5	19,8	24,0	30,3	-6,1	-34,6	-20,7
	60	4,56	24,9	27,4	24,2	25,8	33,5	-18,1	-27,5	-22,9
	120	4,66	26,6	31,0	26,3	30,8	35,2	-11,8	-25,3	-14,2
<b>Diferencias promedio</b>								<b>-11,1</b>	<b>-21,1</b>	<b>-17,8</b>

Se puede apreciar que en el caso de la estimación mediante la expresión de la velocidad la diferencia es más significativa para los 28 días, lo que puede deberse al estado higroscópico del hormigón de las placas, que se curaron al aire en ambiente de laboratorio; mientras que en el caso de utilizar la expresión del número de rebote, no hay una edad en la que el método haya producido diferencias menores que en otra. De cualquier forma, se aprecia que combinando ambos métodos las diferencias son más uniformes, aún cuando el promedio sea mejor para la estimación mediante el método de la velocidad del pulso tomado individualmente.

A pesar de que, como se puede apreciar en esta tabla, los porcentajes de diferencia entre las resistencias estimadas con las que se han obtenido del ensayo de los testigos a compresión han resultado, en algunos casos, más elevadas que lo que se esperaba, puede considerarse un muy buen resultado al promedio de diferencia en la estimación (- 17,8 %), inferior a muchos de los presentados por la bibliografía, y por la forma en que se obtuvo la diferencia, resulta subestimar la resistencia, por lo que se está del lado de la seguridad.

Se pueden justificar estas diferencias si se tiene en cuenta que no se consideraron factores que pueden modificar algunas de las determinaciones, como la humedad, el diámetro de los testigos extraídos, respecto al tamaño máximo del agregado grueso y las diferencias en el curado de probetas y placas entre otros.

### **VI.3.2.- Verificación con los resultados obtenidos en obras del medio**

En las **Tablas N° 37 y 38** se vuelcan los valores de resistencia obtenidos en el ensayo a compresión simple de las probetas confeccionadas en las obras estudiadas, como así también las resistencias estimadas mediante las expresiones de correlación logradas y las diferencias, expresadas en porcentajes, entre éstas y la resistencia a la rotura.

En la **Tabla N° 39**, de página 91, se muestra la verificación realizada en la obra de la ciudad de San Salvador de Jujuy, en la que se han utilizado las expresiones **N° 1, 2 y 3**, ya que la edad de la estructura es de varios años.

**Tabla N° 37: Verificación de resultados en obras del medio**

Obra	Piso	Elemento	Vel. km/s	N° de rebote	Resistencia a Compresión Estimada (MPa)			$\delta$ MPa	$\sigma'_{\text{probetas}}$ MPa	$\delta$	Diferencias			Resistencias (MPa)
					$\sigma'_1$ (Vel)	$\sigma'_2$ (Reb)	$\sigma'_3$ (Comb)				% ( $\sigma'_1$ )	% ( $\sigma'_2$ )	% ( $\sigma'_3$ )	
N° 1	Sub-suelo	Pie Tanque	4,30	18,6	18,0	17,0	16,3	0,119	13,9	0,094	29,2	22,2	17,0	$\sigma'_3 = 16,6 \pm 2,0$ $\sigma'_p = 13,6 \pm 1,3$
		Tabique	4,19	19,5	14,0	18,0	14,8		12,2		14,9	47,5	21,0	
		Col. Centro	4,21	27,4	14,7	27,2	18,7		14,7		0,2	85,3	27,2	
	Planta Baja	Tabique	3,97	19,1	6,1	17,5	11,5	0,189	14,9	0,093	-58,9	17,8	-23,2	$\sigma'_3 = 15,8 \pm 3,0$ $\sigma'_p = 17,0 \pm 1,6$
		Col.Atrás	4,21	24,8	14,7	24,1	17,4		18,2		-19,1	32,5	-4,3	
		Col.Centro	4,15	24,6	12,6	23,9	16,2		16,5		-23,8	44,8	-1,7	
	1er. piso	Col.frente	4,19	27,3	14,0	27,1	18,2	0,199	18,2	0,217	-23,0	49,0	0,2	$\sigma'_3 = 20,6 \pm 4,0$ $\sigma'_p = 22,6 \pm 4,9$
		Viga 1	4,14	26,0	12,2	25,5	16,7		19,8		-38,3	29,0	-15,9	
		Viga 2	4,25	26,5	16,2	26,1	19,1		19,8		-18,4	32,1	-3,7	
N° 2	Sub-suelo	Tabique	4,45	27,6	23,3	27,5	24,5	0,023	28,3	0,000	-17,6	-2,9	-13,5	$\sigma'_3 = 15,2 \pm 0,4$ $\sigma'_p = 21,1 \pm 0,0$
		Columna	4,18	21,6	13,7	20,4	15,4		21,1		-35,3	-3,4	-26,8	
	Tabique	4,13	22,3	11,9	21,2	14,9	21,1	-43,8	0,4	-29,4				
<b>Diferencias promedio (en valor absoluto)</b>											<b>26,8</b>	<b>30,6</b>	<b>15,3</b>	

Se muestran en la tabla el coeficiente de variación correspondiente a la **Expresión N° 3** y al del ensayo a compresión de las probetas como así también la resistencia resultante de la estimación, mediante el uso de la expresión combinada y de la rotura de las probetas, para cada hormigón estudiado en las dos obras.

Se puede apreciar que al considerar la **Expresión N° 3**, la combinación de ambos métodos, la estimación de la resistencia es muy buena. Para el caso de considerar las correlaciones individualmente las estimaciones sufren diferencias mayores.

Como las probetas fueron ensayadas a 28 días de edad, se verificó también la estimación de la resistencia con las expresiones obtenidas para esa edad, resultando lo volcado en la siguiente tabla:

**Tabla N° 38: Verificación de resultados en obras del medio** (Con las expresiones para los 28 días de edad)

$$\sigma'_{(v)28} = 0,006 v^{5,501}$$

$$\sigma'_{(N)28} = 0.746 N + 5,421$$

$$\sigma'_{(v,N)28} = 24,933 v + 0,228 N - 94,039$$

Obra	Piso	Elemento	Vel. km/s	N° de rebote	Resistencia a Compresión Estimada (MPa)			$\delta$ MPa	$\sigma'_{probetas}$ MPa	$\delta$	Diferencias			Resistencia (MPa)
					$\sigma'_e$ (Vel)	$\sigma'_e$ (Reb)	$\sigma'_e$ (Comb)				% ( $\sigma'_v$ )	% ( $\sigma'_N$ )	% ( $\sigma'_{v,N}$ )	
N° 1	Sub-suelo	Pie Tanque	4,30	18,6	18,3	19,3	18,5	0,087	13,9	0,094	31,8	38,8	33,3	$\sigma'_{28} = 17,8 \pm 1,5$ $\sigma'_p = 13,6 \pm 1,3$
		Tabique	4,19	19,5	15,9	20,0	16,0		12,2		30,9	63,7	31,5	
		Col. Centro	4,21	27,4	16,3	25,9	18,8		14,7		10,9	75,9	28,0	
	Planta Baja	Tabique	3,97	19,1	11,8	19,7	10,4	0,234	14,9	0,093	-20,8	32,0	-29,9	$\sigma'_{28} = 15,8 \pm 3,7$ $\sigma'_p = 17,0 \pm 1,6$
		Col.Atrás	4,21	24,8	16,3	23,9	18,1		18,2		-10,4	31,4	-0,7	
		Col.Centro	4,15	24,6	15,1	23,8	16,5		16,5		-8,7	44,1	0,1	
	1er. piso	Col.frente	4,19	27,3	15,9	25,8	18,3	0,204	18,2	0,217	-12,7	41,7	0,5	$\sigma'_{28} = 20,4 \pm 4,2$ $\sigma'_p = 22,6 \pm 4,9$
		Viga 1	4,14	26,0	14,9	24,8	16,7		19,8		-24,9	25,3	-15,8	
		Viga 2	4,25	26,5	17,2	25,2	19,6		19,8		-13,3	27,2	-1,2	
N° 2	Sub-suelo	Tabique	4,45	27,6	22,1	26,0	24,9	0,044	28,3	0,000	-21,8	-8,1	-12,5	$\sigma'_{28} = 15,9 \pm 0,7$ $\sigma'_p = 21,1 \pm 0,0$
		Columna	4,18	21,6	15,7	21,5	16,4		21,1		-25,7	2,1	-22,3	
		Tabique	4,13	22,3	14,7	22,1	15,4		21,1		-30,5	4,5	-27,2	
<b>Diferencias promedio (Valor absoluto)</b>											<b>20,1</b>	<b>32,1</b>	<b>16,89</b>	

También se presenta en esta tabla el coeficiente de variación de la estimación con la expresión combinada y el de la resistencia de las probetas ensayadas a compresión, como así también la resistencia estimada y la obtenida con la rotura de las probetas con sus desviaciones.

Se puede ver en esta última tabla, que al utilizar las expresiones logradas para los 28 días, la misma edad a que se ensayaron las probetas extraídas de las dos obras, la diferencia promedio, al emplear la expresión combinada, es un poco mayor que la obtenida con la **Expresión N° 3** para todas las edades de los hormigones. Lo que indica que conviene utilizar esta última.

**VI.3.3.- Verificación de los resultados obtenidos en la Obra de la ciudad de San Salvador de Jujuy** (Se utilizan las Expresiones N° 1, 2 y 3)

Como en los casos anteriores, se utilizó:

$$\sigma'_1 = 35,84 v - 136,16$$

$$\sigma'_2 = 0,483 N^{1,218}$$

$$\sigma'_3 = 0,086 (3,013^v) (1,028^N)$$

**Tabla N° 39 a: Losas**

Nivel	N	v km/s	RESISTENCIA A COMPRESIÓN ESTIMADA (MPa)			TESTIGOS MPa	Dif. %
			$\sigma'_1$	$\sigma'_2$	$\sigma'_3$		
P.B.	40,3	4,33	19,0	43,5	31,0	51,6	-39,9
1er. ENTR.	36,4	---	---	38,5	---	---	---
2do. ENTR.	41,1	---	---	44,6	---	53,3	---
PISO 1	47,6	---	---	53,3	---	34,4	---
PISO 2	28,6	3,90	3,6	28,7	14,0	24,7	-43,3
PISO 3	31,6	3,94	5,1	32,4	15,9	29,5	-46,1
PISO 4	24,9	---	---	24,3	---	---	---
PISO 5	30,8	4,19	14,0	31,4	20,5	36,4	-60,2
PISO 6	33,3	4,19	14,0	34,5	21,9	23,6	-7,2
PISO 7	32,6	3,77	-1,0	33,6	13,5	20,9	-35,4
PISO 8	34,8	4,01	7,6	36,4	18,7	33,9	-44,8
PISO 9	33,0	4,25	16,2	34,2	23,2	23,3	-0,4
PISO 10 (a)	33,3	4,44	23,0	34,5	28,8	28,7	0,3
PISO 10 (b)	30,1	---	---	30,5	---	27,3	---
TERRAZA	27,1	---	---	26,8	---	---	---
<b>Promedio</b>							<b>-30,8</b>

La diferencia se obtiene respecto de la estimación de la resistencia con la **Expresión N° 3**, y se puede apreciar que el promedio resulta elevado. Esto se explica por los valores obtenidos de los ensayos: no se ha tenido en cuenta el estado higrométrico del hormigón, al momento de la realización del ensayo y en losas el espesor es pequeño y por lo tanto la determinación del tiempo de pasaje del pulso no es buena y resultan algunos valores bajos, por debajo de los obtenidos en la correlación realizada y para los cuales no resulta buena ésta. Tampoco ha sido tomada en cuenta la posibilidad que la superficie ensayada haya estado carbonatada, debido a la edad de la estructura, obteniéndose valores muy altos del número de rebote, que inciden de manera importante en la expresión de la estimación de la resistencia. Estos valores están por encima de los utilizados para la obtención de la correlación y no es conveniente la extrapolación.

**Tabla N° 39 b: Columnas**

NIVEL	v km/s	N	ESTIMACIÓN		
			$\sigma'_1$	$\sigma'_2$	$\sigma'_3$
	MPa				
P.BAJA	3,84	47,5	1,5	53,2	22,1
2do. ENTR.	4,11	51,3	11,1	58,4	33,0
PISO 3	3,71	46,0	-3,2	51,2	18,3

NIVEL	v	N	ESTIMACIÓN		
			$\sigma'_1$	$\sigma'_2$	$\sigma'_3$
	km/s		MPa		
PISO 4	4,01	47,5	7,6	53,2	26,6
PISO 6	3,95	42,3	5,4	46,2	21,6
PISO 8	3,95	49,8	5,2	56,4	26,4
PISO 9	4,01	46,3	7,6	51,5	25,8
PISO 10	4,16	49,5	12,8	56,0	33,1

Se observa en la **Tabla N° 39 a**, que existe mucha diferencia entre la resistencia obtenida con las distintas expresiones. En el caso de las columnas, no se dispone de testigos para hacer una comparación con la resistencia estimada. Esto es debido a los bajos valores obtenidos en ultrasonido y los altos números de rebote, en ambos casos fuera de los valores estudiados en los dos casos.

#### VI.3.4.- Verificación de los resultados en ensayos de rutina del LEM

Los valores promedio de velocidad del pulso y número de rebote, de la **Tabla N° 35**, se reemplazaron en las **Expresión N° 1, N° 2 y N° 3**, y se comparó con la resistencia a compresión promedio que se encuentra en la misma tabla.

- a) Reemplazando tenemos  $\sigma'_1 = 35,84 \times 4,67 - 136,16 = 31,2 \text{ MPa}$
- b) Para el número de rebote  $\sigma'_2 = 0,483 \times 26,9^{1,218} = 26,6 \text{ MPa}$
- c) Para los ensayos combinados  $\sigma'_3 = 0,086 \times 3,013^{4,67} \times 1,028^{26,9} = 31,2 \text{ MPa}$

Teniendo en cuenta el primer resultado (velocidad del pulso) o el último (ensayos combinados), se aprecia que difieren del obtenido mediante el ensayo de compresión simple (**32,1 MPa**) de las probetas en un **2,8 %**, considerado como excelente y para el caso del número de rebote en un **17,1 %**, valor considerado como bueno.

Se proponen, entonces, en esta tesis, para la estimación de la resistencia de hormigones normales en estructuras terminadas, las siguientes expresiones:

**Expresión N° 1:**  $\sigma'_1 = 35,84 v - 136,16$   $r = 0,893$

**Expresión N° 2:**  $\sigma'_2 = 0,483 N^{1,218}$   $r = 0,830$

**Expresión N° 3:**  $\sigma'_3 = 0,086 (3,013^v) (1,028^N)$   $r = 0,927$

Se indican los respectivos coeficientes de correlación.

## **CAPÍTULO VII**

**COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS**

**CON LOS DE OTROS AUTORES**

## VII.1.- COMPARACIÓN CON OTROS RESULTADOS

En esta sección se comparan los resultados obtenidos en el presente trabajo, es decir las **Expresiones N° 1, N° 2 y N° 3**, con los obtenidos por otros autores. Cabe aclarar que las condiciones de trabajo experimental, en los casos comparados pueden no ser las mismas que las empleadas en el presente trabajo. Pero en todos los casos se comparan expresiones obtenidas a partir de materiales de similares características.

### VII.1.1.- Velocidad del pulso ultrasónico

Las expresiones consideradas fueron las siguientes:

- a) Castro & Ribeiro (Ref. N° 21): En este trabajo se llenan dos probetas cilíndricas de 15 cm x 30 cm y un prisma de 30 cm x 30 cm de lado y 10 cm de altura, de varios tipos de hormigones que provee una empresa de Río de Janeiro (Brasil) en el momento en que estos se colocaban en distintas estructuras. Luego de 24 hs. fueron colocadas sumergidas en agua, hasta la fecha de ensayo. Se correlacionaron los valores de velocidad del pulso y número de rebote obtenidos en los prismas con la resistencia a compresión simple obtenida en las probetas cilíndricas. La expresión de correlación para la velocidad es:

$$\sigma'_c = 0,002559.e^{2,071.V}$$

- b) Guerrero, Torrent y Valiente (Ref. N° 14): En este trabajo se elaboraron hormigones con canto rodado, cuyo tamaño máximo era de 1 ½" (o sea un poco mayor que el utilizado en el presente trabajo), arena sílicea y las relaciones a/c siguientes: 0,35; 0,42; 0,46; 0,50; 0,57; 0,65 y 0,75. Se elaboraron 4 probetas cilíndricas de 15 cm x 30 cm por cada relación a/c, que fueron curadas en agua saturada con cal hasta la fecha de ensayo, los 28 días de edad. Se obtuvo para cada hormigón, el promedio de la velocidad del pulso ultrasónico y el promedio de la resistencia a compresión de las mismas, de las cuatro probetas. Estos valores se correlacionaron, encontrándose la siguiente expresión:

$$\sigma'_c = 2,096.10^{-4}.e^{2,429.10^{-3}.V}$$

donde la velocidad del pulso está expresada en m/s y la resistencia en MPa.

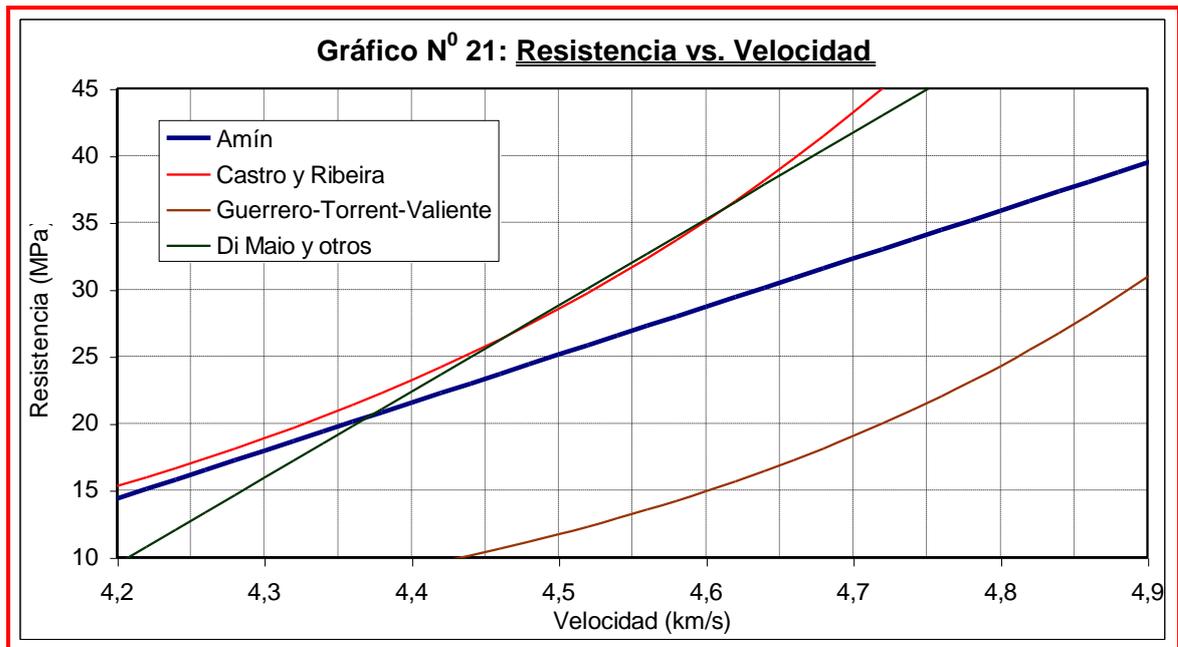
- c) Di Maio, Traversa, Giovambatista y Giaccio (Ref. N° 30): Se utilizaron para este trabajo distintos tipos de agregados gruesos, interesándonos para este caso la grava granítica. Como agregado fino se utilizó arena también sílicea. Se elaboraron probetas normalizadas cilíndricas de 15 cm x 30 cm y elementos estructurales de 15 cm x 15 cm y 100 cm de altura y otros de 30 cm x 60 cm y 200 cm de altura. Los ensayos se realizaron a 28 días de edad del hormigón. La expresión de correlación se obtuvo con los especímenes cilíndricos y los valores fueron verificados en los elementos estructurales, extrayendo testigos. La expresión de correlación obtenida fue:

$$\sigma'_c = 64,6.v - 261,0$$

donde la resistencia se expresa en MPa y la velocidad del pulso en km/s.

- d) Amin (**Expresión N° 1**): resultado del presente trabajo. La resistencia se expresa en MPa y la velocidad en km/s

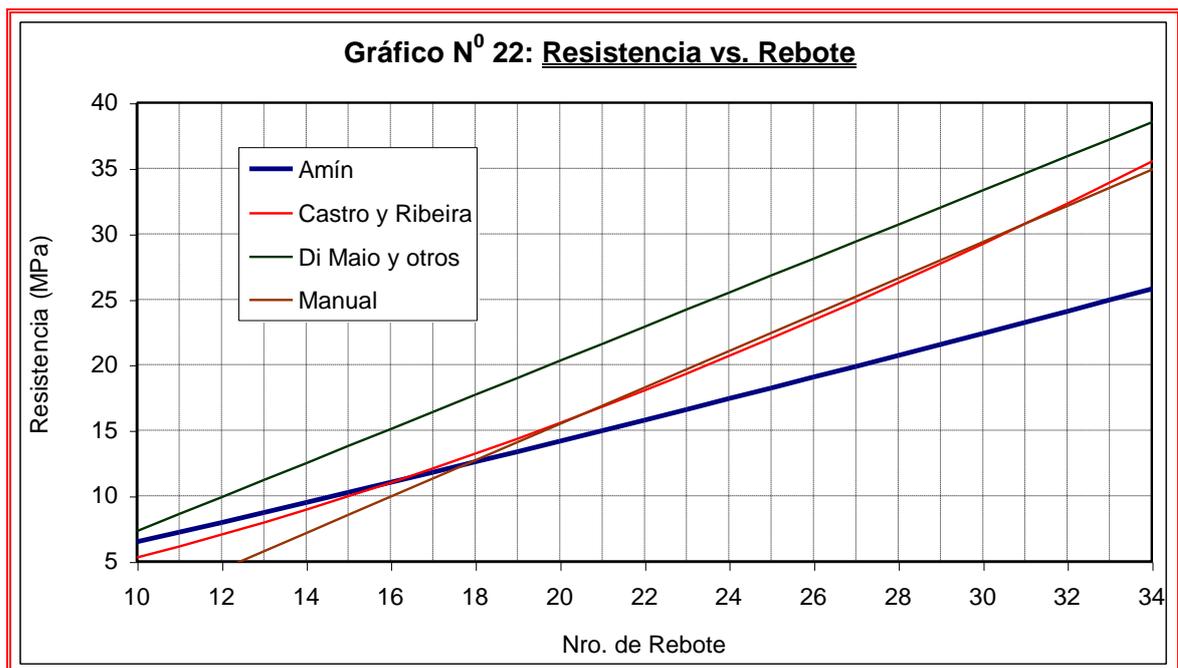
$$\sigma'_1 = 35,84.v - 136,16$$



### VII.1.2.- Esclerometría

Las expresiones consideradas fueron las siguientes:

- a) Castro & Ribeiro (Ref. N° 21):  $\sigma_c = 0,148.N^{1,554}$
- b) Di Maio, Traversa, Giovambatista y Giaccio:  $\sigma_c = 1,3.N - 5,7$
- c) Amín (**Expresión N° 2**):  $\sigma_2 = 0,483.N^{1,218}$
- d) Manual del esclerómetro:  $\sigma_c = 1,39.N - 12,26$



### VII.1.3.- Velocidad y Esclerometría

Se consideraron las siguientes expresiones, tomando como ejemplo sólo **N = 24**

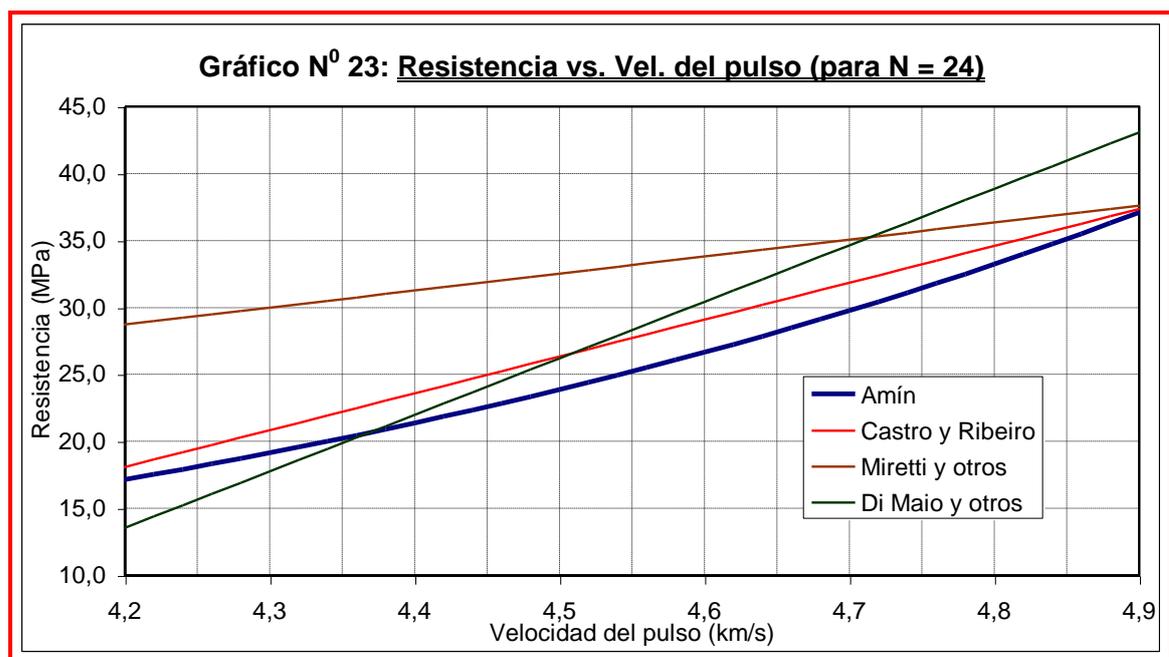
- a) Miretti, Grether, Passerino y Carrasco (Ref. N° 13): En este trabajo se ensayaron 313 probetas normalizadas cilíndricas enviadas por empresas constructoras para ser ensayadas en el Servicio de Estudios y Ensayos para la Construcción de la U.T.N., regional Santa Fe, por lo que se desconocen las proporciones de los componentes de los hormigones, sólo que se usó canto rodado. Se arribó a la siguiente expresión utilizando un análisis multivariable:

$$\sigma'_c = 0,0127.v + 0,581.N - 49,2$$

- b) Castro y Ribeiro (Ref. N° 21):  $\sigma'_c = 27,52.v + 0,56.N - 110,94$

- c) Di Maio, Traversa, Giovambatista (Ref. N° 12):  $\sigma'_c = 42,2.v + 0,6.N - 178,1$

- d) Amín (Expresión N° 3)  $\sigma'_3 = 0,086.(3,013^v).(1,028^N)$



En todos los gráficos se consideran los valores mínimos y máximos de velocidad del pulso y número de rebote que se han obtenido en el presente trabajo, considerados como valores límites para cada caso.

En los gráficos se puede apreciar que para la velocidad del pulso la curva obtenida no concuerda con ninguna de las obtenidas por los otros autores, para el número de rebote es intermedia a las otras y en el caso de la expresión combinada resulta ser logarítmica mientras que todas las de los otros autores estudiados resultaron lineales.

Se puede ver que en todos los casos las expresiones logradas estiman valores de resistencia por debajo de lo que lo hacen otros autores.

Se aprecia, por lo tanto, la importancia del trabajo en obtener curvas de correlación para los materiales y según la tecnología usuales en esta región.

## **CAPÍTULO VIII**

### **CAPO TEST**

## VIII.1.- EXTRACCIÓN DE INSERTOS: CAPO Test

### VIII.1.1.- Descripción del ensayo

El ensayo de CAPO Test (**C**ut **A**nd **P**ull **O**ut) ya fue descrito en el **Capítulo II**, y como se dijo, consiste en extraer un inserto que es colocado en el elemento estructural en el momento en que se realiza el estudio. Siendo su mayor ventaja, el hecho de no tener que dejar el inserto en el momento del colado del hormigón, como los otros métodos de extracción de insertos. El ensayo puede hacerse en cualquier momento de la vida de la estructura, aún cuando no se haya previsto para ésta una futura extracción.

Como se indicó en el apartado **II.1.3**, se practica un orificio en el elemento estructural en estudio y dentro de éste, a una determinada profundidad, se realiza un ensanchamiento, donde se aloja la arandela expansible. Se introduce el inserto y se ajusta la tuerca hasta que la arandela queda firme en el ensanchamiento. Luego con el brazo extractor, y haciendo girar la manivela, se extrae el inserto, marcándose en el dial del equipo la fuerza de extracción, en kilonewtons, que es el resultado del ensayo.

Por ser éste un ensayo de creciente difusión en nuestra región, e inclusive en nuestro país, es que se trabajó con él, para tratar de encontrar una expresión de correlación entre la fuerza de extracción del inserto y la resistencia a compresión del hormigón y adquirir la experiencia necesaria para aplicarlo en estructuras del medio.



**Fotografía N° 16: Equipo extractor**

(Pueden apreciarse en la imagen, dos orificios de la extracción de insertos y uno de la extracción de testigo)

### VIII.1.2.- Determinaciones realizadas

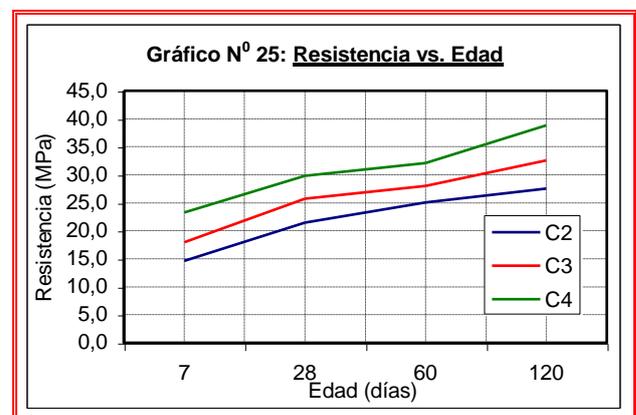
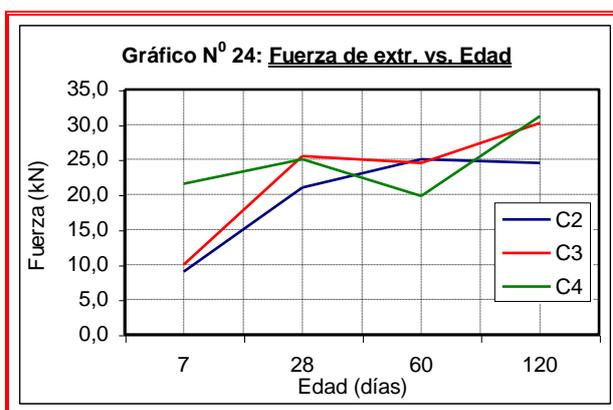
Los valores de las determinaciones de la fuerza de extracción de insertos sobre las placas fueron volcados en las **Tablas N° 10 a N° 21**, del **Capítulo V**. Cabe aclarar que este ensayo no se realizó para el hormigón **C1**.

A continuación, en la **Tabla N° 40**, se presenta un resumen de los valores promedios de los 2 (dos) ensayos realizados para cada tipo de hormigón a las edades de 7, 28 y 60 días y de los 3 (tres) realizados a los 120 días de edad, obtenidos de la fuerza de extracción, como así también la resistencia a compresión promedio, para cada fecha y cada hormigón, de las probetas de 15 cm x 30 cm y las de 10 cm x 20 cm, confeccionadas juntamente con las placas correspondientes.

**Tabla N° 40: Resumen de valores para correlacionar  $\sigma'_c$  y F**

Hormigón	Edad	Fuerza de extracción	$\sigma'_c$ Probetas
	días	kN	MPa
C2	7	9,0	14,6
	28	21,0	21,5
	60	25,0	25,1
	120	24,5	27,5
C3	7	10,0	17,9
	28	25,5	25,7
	60	24,5	28,0
	120	30,2	32,6
C4	7	21,5	23,3
	28	25,0	29,8
	60	19,8	32,1
	120	31,2	38,8

En los siguientes gráficos podemos comparar el comportamiento de la fuerza de extracción de los insertos con la edad del hormigón y compararlo con la variación de la resistencia con la edad.



### VIII.1.3.- Correlación entre Resistencia y Fuerza de Extracción de insertos

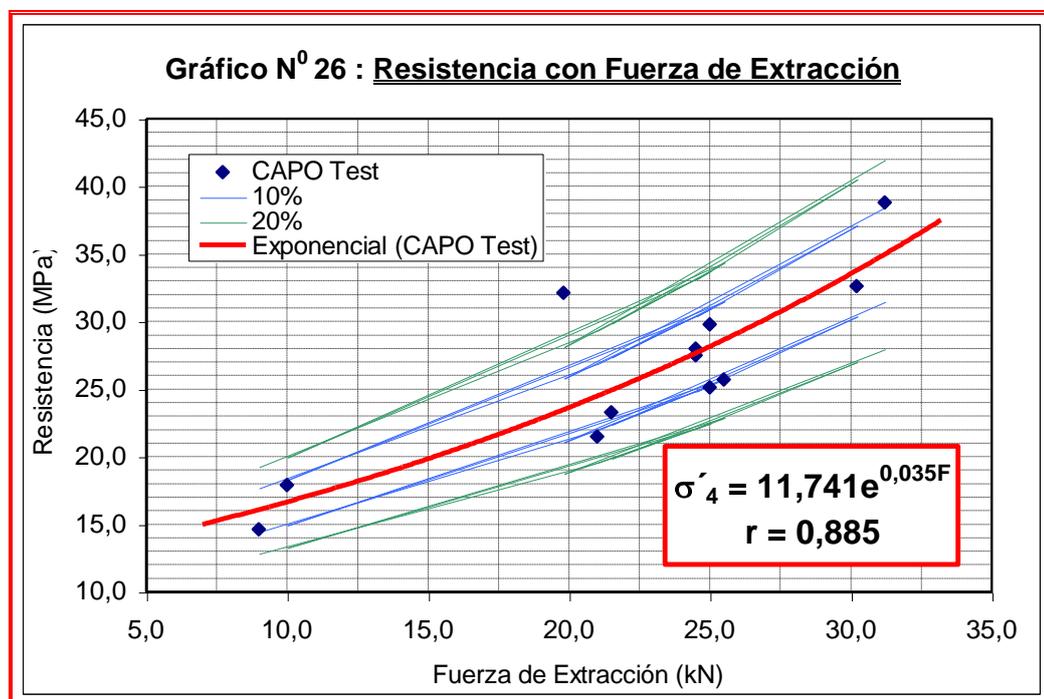
Con estos valores se buscó una correlación entre la fuerza de extracción y la resistencia a compresión de las probetas. Al igual que en el caso de velocidad del pulso y de número de rebote, se trató de encontrar la correlación cuyo *coeficiente de correlación* sea más próximo al valor 1.

En el **Gráfico N° 26** se presentan los valores obtenidos y la línea de tendencia que mejor representa a los valores, su expresión y el coeficiente de correlación.

También se presentan las curvas que se alejan de la de correlación obtenida en un 10 % y en un 20 %.

Se puede apreciar que los resultados experimentales obtenidos se encuentran a un:

- 10 % el 58 % y
- 20 % el 92 %



Siendo **F = fuerza de extracción del inserto**

Se consideró a ésta como la **Expresión N° 4**

$$\sigma'_4 = 11,741 e^{0,035 F} \quad r = 0,885$$

### VIII.1.4.- Correlación múltiple

Se probó a continuación de correlacionar los tres ensayos realizados para estimar la resistencia del hormigón.

En la **Tabla N° 42** se presenta un resumen de los valores promedios de velocidad del pulso, número de rebote, valores promedio de cada edad y de cada hormigón, obtenidos sobre las probetas y fuerza de extracción obtenida sobre las placas, también para cada hormigón y edad del ensayo, como así también la resistencia a compresión de las probetas correspondientes.

Tabla N° 41: Resumen de valores para correlación múltiple:  $\sigma'$  vs. v, N y F

Hormigón	Edad	Velocidad	Nro. de Rebote	Fuerza de extracción	$\sigma'$ Probetas
	días	km/s		kN	MPa
C2	7	4,27	16,3	9,0	14,6
	28	4,41	21,1	21,0	21,5
	60	4,50	25,1	25,0	25,1
	120	4,10	25,8	24,5	27,5
C3	7	4,26	20,3	10,0	17,9
	28	4,65	24,1	25,5	25,7
	60	4,60	26,4	24,5	28,0
	120	4,67	29,3	30,2	32,6
C4	7	4,46	22,0	21,5	23,3
	28	4,65	29,4	25,0	29,8
	60	4,65	29,9	19,8	32,1
	120	4,76	30,5	31,2	38,8

Con estos valores, y efectuando una correlación de tipo logarítmico se arribó a la siguiente expresión:

Expresión N° 5  $\sigma'_5 = 6,224 \cdot (1,011^v) \cdot (1,045^N) \cdot (1,012^F) \quad r = 0,988$

que como se puede apreciar, tiene un muy buen coeficiente de correlación.

#### VIII.1.5.- Verificación de los resultados obtenidos en obra de S. S. de Jujuy

Se utilizaron los valores obtenidos en las losas en que se obtuvieron todos los valores de los ensayos, como así también los testigos. Para la estimación de la resistencia se utilizó en primer lugar la **Expresión N° 4** con los valores de la fuerza de extracción de insertos solamente, **Tabla N° 42**, y luego la **Expresión N° 5** con los resultados de los ensayos ultrasónicos, esclerométricos y de CAPO Test, en **Tabla N° 43**.

Tabla N° 42: Verificación de resultados en obra de S. S. de Jujuy (CAPO Test)

Nivel	F	Estimación	$\sigma'$ Testigos	Diferencia
	kN	MPa		%
P.B.	30,5	34,1	51,6	-33,8
PISO 2	12,5	18,2	24,7	-26,4
PISO 3	18,5	22,4	29,5	-24,0
PISO 5	11	17,3	36,4	-52,6
PISO 7	13	18,5	20,9	-11,5
PISO 8	13,5	18,8	33,9	-44,4
PISO 9	13,5	18,8	23,3	-19,2
PISO 10 (a)	10	16,7	28,7	-41,9
Promedio				-31,7

Tabla N° 43: Verificación de resultados en obra de S. S. de Jujuy

Nivel	v	N	F	Estimación	$\sigma'$ Testigos	Diferencia
	km/s		kN			
P.B.	4,33	40,3	30,5	55,5	51,6	7,6
PISO 2	3,90	28,6	12,5	26,6	24,7	7,8
PISO 3	3,94	31,6	18,5	32,7	29,5	10,7
PISO 5	4,19	30,8	11,0	28,9	36,4	-20,6
PISO 7	3,77	32,6	13,0	31,9	20,9	52,7
PISO 8	4,01	34,8	13,5	35,5	33,9	4,6
PISO 9	4,25	33,0	13,5	32,8	23,3	41,0
PISO 10 (a)	4,44	33,3	10,0	32,0	28,7	11,4
<b>Promedio</b>						<b>14,4</b>

Obteniéndose la diferencia con la expresión:

$$d(\%) = \frac{\sigma'_E - \sigma'_T}{\sigma'_T} \times 100$$

Puede observarse en la tabla precedente que, salvo en algunos casos (que pueden deberse al estado de los testigos y recordando como se dijo en capítulos anteriores, que en los ensayos no destructivos realizados en la obra citada no se han tenido en cuenta algunos factores importantes, como la humedad del hormigón, la carbonatación de la superficie, el espesor de las losas, etc.), las diferencias obtenidas entre la resistencia a compresión simple de los testigos extraídos de las losas y la resistencia estimada mediante la expresión de correlación múltiple son muy bajas, promedio **14,4 %**, por lo que se concluye que la combinación de los tres métodos de ensayo puede darnos estimaciones de la resistencia muy buenas, pero deberá contemplarse el costo y el tiempo necesarios para la realización de los tres ensayos.

## **CAPÍTULO IX**

### **CONCLUSIONES**

### **SUGERENCIAS DE LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

### IX.1.- Conclusiones

Considerando que el objetivo del presente trabajo de Tesis consistió en la determinación de correlaciones entre ensayos destructivos y no destructivos (END), a fin de estimar mediante estos últimos la resistencia efectiva de hormigones **elaborados con materiales de la región y según el arte de la construcción en la zona**, a continuación se indican las conclusiones que surgen del trabajo realizado.

- 1.- De la realización de los ensayos surgió que para la estimación de la resistencia de hormigones normales, los métodos ultrasónico y de esclerometría resultaron ser los END de más sencilla y rápida ejecución.
- 2.- Los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos realizados tanto en probetas como en placas, evidenciaron dispersiones iguales o por debajo a las referidas por otros autores en trabajos similares. Este hecho indica que las determinaciones se efectuaron teniendo en cuenta las recomendaciones necesarias para cada ensayo, lo cual permitió obtener resultados dentro de las tolerancias aceptables.
- 3.- Se comprobó que las expresiones de correlación para la estimación de la resistencia obtenidas en probetas, para todas las edades del hormigón (**Expresiones N°1, 2 y 3**) brindan mejores resultados que las expresiones correspondientes a cada edad del hormigón por separado. Al analizar los resultados por edades, se observó que las mayores diferencias entre resistencias estimadas y obtenidas del ensayo de compresión axial, corresponden a expresiones para 7 días. Este hecho debe ser atribuido a la dispersión de los resultados de ensayos obtenidos a tan corta edad, fundamentalmente mediante esclerometría.
- 4.- De acuerdo con los resultados obtenidos, la estimación de la resistencia de hormigones de cemento portland elaborados con materiales de características similares a los empleados en este estudio y bajo condiciones semejantes de exposición, se puede efectuar mediante la aplicación del método ultrasónico, utilizando la **Expresión N° 1**,

$$\sigma_1 = 35,84 \cdot v - 136,16$$

para la cual se obtuvo, entre todas las curvas de correlación determinadas, el mejor coeficiente de correlación,  $r = 0,893$ . En este caso el **86 %** de las determinaciones realizadas caen dentro de las curvas límites de confianza del  $\pm 20 \%$ .

- 5.- Considerando lo indicado en el punto anterior, la estimación de la resistencia del hormigón mediante el uso del esclerómetro, puede efectuarse usando la **Expresión N° 2**:

$$\sigma_2 = 0,483 \cdot N^{1,218}$$

para la cual también se obtuvo un muy buen coeficiente de correlación:  $r = 0,830$ . Para este caso, el **73 %** de las determinaciones esclerométricas promedio para cada probeta están comprendidas dentro de los límites de confianza  $\pm 20 \%$ .

- 6.- Respecto del ensayo de extracción de insertos, CAPO Test, puede indicarse que el resultado que se obtiene, la fuerza de extracción del inserto, es un valor más ligado a la resistencia del hormigón que la velocidad del pulso y el número de rebote. En este trabajo se pudo comprobar que la realización de este ensayo es dificultosa y lenta, ya que se requiere de numerosas precauciones para su correcta ejecución. La expresión de correlación determinada presenta coeficiente de correlación aceptable y permitió buenas estimaciones de la resistencia de hormigones normales. Dicha correlación es la indicada como **Expresión N° 4**:

$$\sigma_4 = 11,741 e^{0,035F}$$

con un coeficiente de correlación  $r = 0,885$ , encontrándose el **92 %** de los resultados obtenidos sobre las placas, dentro de las curvas límites de confianza del  $\pm 20 \%$ .

Con relación a este método es necesario realizar un número mayor de experiencias y verificaciones para una correcta aplicación del mismo.

- 7.- Para la estimación de la resistencia de un hormigón elaborado con materiales de características similares y exposición semejante a los estudiados en este trabajo, desde el punto de vista técnico, se recomienda la utilización de las expresiones de correlación combinadas de ensayos no destructivos, ya que se obtuvieron las menores diferencias porcentuales entre las resistencias estimadas mediante éstas y las obtenidas del ensayo de compresión axial de testigos. Estas expresiones son:

**Expresión N° 3**  $\sigma_3 = 0,086 \cdot 3,013^V \cdot 1,028^N$   $r = 0,927$

y **Expresión N° 5**  $\sigma_5 = 6,224 \cdot 1,011^V \cdot 1,045^N \cdot 1,012^F$   $r = 0,988$

En particular se recomienda la utilización de la primera de ellas, ya que como se dijo, los ensayos de ultrasonido y esclerometría son de rápida ejecución. El empleo de más de dos END, se comprobó que resulta antieconómico y no mejora la estimación.

- 8.- De los resultados obtenidos en los prototipos de laboratorio (placas) surge que en promedio la estimación de la resistencia efectiva de hormigones de diferentes calidades y edades mediante el uso de la **Expresión N° 3**, resultó ser del orden del **18 %** menor que los promedios de resistencia a compresión axial de testigos extraídos de las mismas, subvalorando por lo tanto a la resistencia efectiva, lo que nos pone del lado de la seguridad. Esta diferencia es aceptable considerando que tanto en la obtención de dicha expresión como en los ensayos realizados en las placas no se han tenido en cuenta algunos de los factores que afectan a las determinaciones del tiempo de pasaje del pulso y del número de rebote.
- 9.- También utilizando la **Expresión N° 3**, se estimó la resistencia de hormigones de dos obras del medio obteniéndose desviaciones máximas de un **20 %** en la resistencia estimada y de **22 %** en el valor de la resistencia obtenida por rotura de probetas. La diferencia promedio entre la resistencia estimada y la de la rotura de probetas fue del **15 %**, valor considerado como excelente.
- 10.- Para la obra estudiada en la ciudad de San Salvador de Jujuy, las diferencias han sido elevadas, en promedio **30 %** para las losas, hecho que debe atribuirse a que no se tuvieron en consideración los factores que afectan las determinaciones no destructivas: el estado higrométrico del hormigón estudiado, espesor de los elementos estudiados, la posible carbonatación de la superficie, etc.
- 11.- En hormigones de elementos estructurales de obras del medio se pudo comprobar que:
- las dispersiones de los valores de ultrasonido crecen entre 4 y 6 veces respecto de los valores obtenidos sobre probetas y estructuras confeccionadas y ensayadas en el laboratorio,
  - las dispersiones de los valores de esclerometría no registran aumento comparadas con las obtenidas sobre probetas y estructuras confeccionadas y ensayadas en el laboratorio.

Lo antes expresado implica que en obra es posible reproducir muy bien las condiciones para efectuar determinaciones esclerométricas. Por el contrario, el notable crecimiento en la dispersión de las determinaciones del tiempo de paso del pulso ultrasónico implica que en obra se presentan variables (estado de humedad del hormigón,

medición de espesores, contacto entre los transductores y la superficie, etc.) que afectan los resultados de este método y que deben ser cuidadosamente evaluados para una mejor utilización de este ensayo.

Aún así las estimaciones obtenidas con la **Expresión N° 1**, método ultrasónico solamente, fueron mejores que las obtenidas con la **Expresión N° 2** de esclerometría únicamente.

- 12.- Se pudo comprobar que las ecuaciones de correlación individuales obtenidas (**Expresiones N° 1 y 2**) siguen las mismas tendencias que las propuestas por otros autores. También es de destacar que las resistencias estimadas que se obtienen con las **Expresiones N° 1 y 2** son, en general, menores que las que se logran con las expresiones con las que se comparó.

Por otra parte, la **Expresión N° 3**, de correlación de ensayos combinados, obtenida es del tipo logarítmica, mientras que las propuestas por otros autores son rectas. Esto demuestra la importancia de la obtención de este tipo de correlaciones para los materiales de la región.

- 13.- Las expresiones de correlación obtenidas en este trabajo tienen validez **solamente en los rangos de resistencias de los hormigones estudiados, esto es, para nuestro caso, entre H13 y H30, y para los materiales empleados, en particular para el tipo de agregado grueso**, no debiéndose extrapolar. Además, dichas expresiones deben utilizarse para valores de END que se encuentren dentro de los resultados obtenidos en este trabajo, es decir:

- **Velocidad del pulso:** entre 4,1 y 4,9 km/s
- **Esclerometría:** entre 10 y 34 números de rebote
- **Fuerza de extracción de insertos:** entre 9 y 31 kN

- 14.- A pesar de los buenos resultados obtenidos, existen distintos factores que influyen sobre las determinaciones realizadas con los END, motivo por el cual deben ser cuidadosamente evaluados al momento de interpretar los resultados.

## IX.2. Sugerencias de líneas de investigación

- 1.- Aún cuando se conoce la influencia de un gran número de factores sobre los distintos ensayos no destructivos, hay algunos de mayor incidencia en los resultados que pueden obtenerse de estos ensayos. Entre estos factores se recomienda, para los materiales y el arte de la construcción de la región, el estudio de los siguientes:
  - a.-Influencia del estado higrométrico en las determinaciones de la velocidad del pulso y el número de rebote en hormigones contruidos con materiales de la región.
  - b.-Influencia en el resultado obtenido en el ensayo de determinación del número de rebote de la carbonatación de la superficie del hormigón que puede producirse en la región.
  - c.-Influencia del uso de los distintos tipos de encofrados en el resultado obtenido en el ensayo de determinación del número de rebote, como así también la del uso de desencofrantes.
- 2.- Propuesta de un programa tendiente a obtener mayor experiencia en el uso y en los factores que pueden modificar o influir sobre las determinaciones realizadas con el *CAPO Test*, para poder aplicarlo concienzudamente al estudio de estructuras de hormigón.
- 3.- Las expresiones de correlación obtenidas, en especial la **Expresión N° 3**, podrían servir para evaluar el daño que pueden presentar hormigones sometidos a algún tipo de agresión: congelación y deshielo, ataques de sulfatos, fuego, etc.
- 4.- Propiciar el estudio y aplicación de técnicas de ensayos no destructivos desarrollados en nuestro país, como ser las de *Fractura localizada* (Ref. 1) y la del *Ensayo de torsión* (Extracción de insertos mediante torsión).
- 5.- Posibilidades de utilización del método ultrasónico en las primeras horas de colado del hormigón para evaluar sus características, a edades tempranas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

## IX.1.- BIBLIOGRAFÍA

A pesar del gran número de referencias a este tema que se hace en la bibliografía consultada, es difícil encontrar un libro referido específicamente a ensayos no destructivos sobre hormigones. Sí se han encontrado numerosas publicaciones en revistas y memorias de congresos, del país y del extranjero, las que permiten sacar algunas conclusiones generales acerca de los ensayos no destructivos sobre hormigones.

- Ref. 1.- DI MAIO, A – *“Evaluación de la Resistencia del Hormigón Mediante Métodos No Destructivos”*. Revista Hormigón N° 8. 1982.
- Ref. 2.- DI MAIO, A – *“Evaluación de las Características de los Hormigones por Métodos no Destructivos”*. 5° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de la Tecnología del Hormigón. 1982.
- Ref. 3.- KLARIC, M.; FAVA, C. – *“Parámetros de Referencia para la Evaluación del Hormigón en Estructuras Mediante Ultrasonido”*. 8° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de la Tecnología del Hormigón. 1987.
- Ref. 4.- COLOMBINO, C.; CÁCERES, E. – *“Parámetros Obtenidos por Medios Ultrasonicos y Electromagnéticos en Hormigones de Estructuras Resistentes”*. Experiencia Regional. 8° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de la Tecnología del Hormigón. 1987.
- Ref. 5.- SUÁREZ, R.; PUEBLA, J.R. – *“Posibles Correlaciones entre Resultados Obtenidos por Ensayos Destructivos y No Destructivos en Hormigones”*. 9° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de la Tecnología del Hormigón. Universidad Nacional de San Juan. 1988.
- Ref. 6.- HAMASAKKI, L.T.; TANABE, S.Y.; LOTTI, F. – *“Aspectos da Aplicabilidade de dois Ensaio Nao Destrutivos em Estruturas de Concreto”*. Publicación del Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1990.
- Ref. 7.- ALBERTO, O.E.; CAIA, L.A.; BONFORTE, A. – *“Comparación de Resultados de Resistencias a la Compresión Obtenidas de Hormigones, Mediante la Aplicación de Métodos de Ensayos Destructivos y No Destructivos”*. CA-DIEM. 1991.
- Ref. 8.- BUNGEY, J.H. – *“The Testing of Concrete in Structures”*. New York, Surrey University, Press. 1982.
- Ref. 9.- PROTASIO, F.C.; UBIRAJARA, L.F. – *“A Homogeneidade do Concreto em Estruturas de Edifícios”*. XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Río Grande do Sul. Noviembre de 1991.
- Ref. 10.- PRUDENCIO, L.R.; REPETTE, W.L. – *“Metodología para a Estimativa da Resistencia do Concreto em Estruturas Acabadas”*. XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Río Grande do Sul. Noviembre de 1991.
- Ref. 11.- VALIENTE, E.; VALER, A.; TORRENT, R. – *“Estimación de la Resistencia del Hormigón Empleando Métodos no Destructivos”*.
- Ref. 12.- DI MAIO, A.; TRAVERSA, L.; GIOBAMBATTISTA, A. – *“Non Destructive Combined Methods Applied to Structural Concrete Members”*. Journal A.S.T.M. Cement, Concrete and Aggregates N° 2, Vol. 7. 1985.
- Ref. 13.- MIRETTI, R.; GREYER, R.; PASSERINO, C.; CARRASCO, M.F. – *“Estimación de la Resistencia a compresión del Hormigón por medio del Método*

- Combinado Ultrasonido-Esclerometría*". Publicado en la Revista "Hormigón" 30/97. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- Ref. 14.- GERRERO, L.; TORRENT, R.; VALIENTE, E. – *"Estimación de la Resistencia del Hormigón Empleando Métodos no Destructivos"*.
- Ref. 15.- BROWN, B.V. – *Concrete Society Digest N° 6*. Concrete Society. 1984
- Ref. 16.- NICO, A. – *"Un Nuevo Enfoque sobre el Análisis Estadístico del Hormigón de una Estructura"*. Publicado en la Revista "Hormigón" 27/94. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- Ref. 17.- POPOVICS, SANDOR Y POPOVICS, JHON S. – *"Effect of Stresses on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concret"*. Materials and Structures N° 24. 1991.
- Ref. 18.- PRUDÊNCIO, LUIZ ROBERTO Y LONGUINI REPETTE, WELLINGTON - *"Metodologia Para a Estimativa da Resistência do Concreto em Estruturas Acabadas"*.
- Ref. 19.- HALPERN, ADRIÁN – *"MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS. Ultrasonido y esclerometría. Su aplicación en Estructuras de Hormigón Aligerado Estructural"*.
- Ref. 20.- AMÍN, DOMINGO LUIS – *"Evaluación de las Características de Hormigones Livianos Estructurales Mediante el Empleo de Ensayos No Destructivos"*. Memorias de CORENDE. Mendoza. Octubre de 1997.
- Ref. 21.- FERREIRA E CASTRO, P., RIBEIRO, L.A. – *"Comparação Entre Ensaio Não-Destrutivos de Avaliação da Resistência do Concreto"*. Colloquia 1987. Porto Alegre – RS, Brasil.
- Ref. 22.- Norma IRAM 1683 – *"Hormigón de Cemento Portland – Método para la Determinación de la Velocidad de Pulsos Ultrasónicos"*.
- Ref. 23.- Norma IRAM 1694 – *"Hormigón de Cemento Portland – Método de Ensayo de la Dureza Superficial del Hormigón Endurecido Mediante la Determinación del Número de Rebote Empleando el Esclerómetro de Resorte"*.
- Ref. 24.- *CAPO Test Manual* – Manual para el uso del CAPO Test Equipment (2-95 kN)
- Ref. 25.- *Concrete Test Hammer* – Manual de operaciones.
- Ref. 26.- *American Society for Testing and Materials* – Annual Book of ASTM Standards. 1993
- Ref. 27.- *America Concrete Institute* – Manual of Concrete Practice.
- Ref. 28.- *National Ready Mixed Concrete Assn.* TIL N° 260 – April 1968.
- Ref. 29.- NEVILLE, A. M. – *"Tecnología del Concreto"*. Noriega Editores. 1984 y 1998
- Ref. 30.- DI MAIO, A.; TRAVERSA, L.; GIOVAMBATTISTA, A. Y GIACCIO, G. – *Evaluation of concrete structures using ultrasonic pulse velocity method* – 3ed. European Conference on Nondestructive Testing – Florencia, Italia – Octubre 1984.
- Ref. 31.- DI MAIO, A.; TRAVERSA, L.; GIOVAMBATTISTA, A.; GIACCIO, G. Y ZERBINO, RAÚL – *Mecanismo de propagación de fisuras y resistencia del hormigón: Efecto de la forma y tamaño del agregado grueso*. Revista HORMIGÓN N° 19, Enero-Junio 1991.
- Ref. 32.- Reglamento CIRSOC 201. Tomo I y Modificaciones. Julio 1982