



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Instituto de Obras Cíviles
Escuela de Ingeniería Civil en obras Cíviles

Profesor Patrocinante
Sr. Hernán Arnés Valencia.
Instituto de Obras Cíviles
Profesor Copatrocinante
Sr. Juan Carlos Miranda C.
Instituto de Estadística

FORMULA EMPIRICA DE PREDICCIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA LOS HORMIGONES CONFECCIONADOS EN LA COMUNA DE VALDIVIA

Memoria de Título presentada para
para optar al Título Profesional de
Ingeniero Civil en Obras Cíviles.

MARÍA ALEJANDRA MAUREIRA GONZÁLEZ

VALDIVIA - CHILE

2006

*A mi padre, quién superó sus defectos y temores, me
enorgullezco de haberte tenido en mi vida, nos dejaste una
tremenda enseñanza, esto es para ti.
Puedes descansar, tu tarea terminó.*

A mi madre, que es la persona a quien más admiro.

Los quiero



AGRADECIMIENTOS

Con esta memoria finalizo una de las etapas más importantes de mi vida, y hay muchas personas que directa o indirectamente han colaborado con este logro, a todos ellos va mi agradecimiento.

Debo decir que me siento profundamente agradecida y bendecida por Dios, quien jamás me ha abandonado y me ha fortalecido en los momentos más difíciles que he vivido.

Agradezco de corazón a mis Padres por su incondicional cariño y apoyo, por ser un ejemplo a seguir, gracias por su paciencia y en especial por su dedicación a nosotros.

Agradezco a mi hermana Paulina por su generosidad, apoyo y preocupación. (ya puedes estar tranquila)

A Marlys y Pamela por apoyarme en el momento más difícil de mi vida, sin ustedes yo no estaría escribiendo esto, gracias por sus sacrificios, por su inmenso cariño y amistad.

A mi hermano José Luis por su alegría

A mis amigos en general Marcela, María José, Tamara, Sylvia, Alberto, Pablo, Marcelo, Claudia y Nevenka, a quienes agradezco su amistad, cariño y apoyo, gracias por estar siempre para mí, además a los que fueron compañeros míos en la Universidad gracias por sus cuadernos y apuntes que fueron muy importantes en el transcurso de mis estudios.

Agradezco a mis profesores patrocinantes, Don Hernán Arnés y Don Juan Carlos Miranda, por su tiempo y conocimientos.

Por último agradezco al Director del laboratorio L.E.M.C.O., Don José Arrey, por el apoyo entregado y dar todas las comodidades en el proceso de registro de información.

INDICE

INDICE DE CUADROS **i**

INDICE DE FIGURAS **ii**

INDICE DE GRÁFICOS **iii**

INDICE DE TABLAS **v**

RESUMEN – ABSTRACT **vi**

INTRODUCCION **vii**

OBJETIVOS **ix**

ESTRUCTURA DE LA MEMORIA DE TITULO **x**

CAPITULO I HORMIGON

1

1.1.	GENERALIDADES	1
1.1.1.	Antecedentes históricos	1
1.1.2.	Definición	3
1.1.3.	Clasificaciones del hormigón	4
1.1.4.	Requisitos generales del hormigón	5
1.1.5.	Características particulares del hormigón	6
1.1.6.	Funciones de los materiales componentes	6
1.2.	MATERIALES PARA FABRICAR HORMIGON	7
1.2.1.	Cemento	7
1.2.1.1.	Generalidades	7
1.2.1.2.	Fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento	9
1.2.1.3.	Clasificación de los cementos fabricados en Chile	10
1.2.2.	Áridos	11
1.2.2.1.	Generalidades	11
1.2.2.2.	Condiciones de los áridos	12
1.2.3.	Agua	16
1.2.3.1.	Generalidades	16
1.2.3.2.	Condiciones del Agua	16
1.2.4.	Aditivos y Adiciones	17
1.2.4.1.	Generalidades	17
1.2.4.2.	Tipos de aditivos y adiciones	18
1.3.	HORMIGON PREMEZCLADO	30
1.3.1.	Generalidades	30
1.3.2.	Factores a considerar para su uso	30
1.3.3.	Elementos utilizados en la fabricación de hormigón premezclado	31
1.3.4.	Especificación del hormigón	32

CAPITULO II RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL HORMIGON

34

2.1.	GENERALIDADES	34
2.2.	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA DEL HORMIGON	36
2.2.1.	Influencia de los materiales	36
2.2.2.	Influencia de la dosificación	36
2.2.3.	Influencia de la razón agua/cemento. Ley de Abrams	37
2.2.4.	Influencia de la edad en la resistencia del hormigón	38
2.3.	ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN	40
2.3.1.	Extracción de muestras del hormigón fresco	40
2.3.1.1.	Extracción de muestras de fabricación	40
2.3.1.2.	Extracción de muestras en sitio	40
2.3.1.3.	Tratamiento de las muestras	41
2.3.2.	Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas	42
2.3.2.1.	Medición probetas	42
2.3.2.2.	Ensayo	42
2.3.2.3.	Resultados	43

3.1.	DESCRIPCION DE DATOS	44
3.1.1.	Medidas numéricas descriptivas	44
3.1.1.1.	Medidas de centralización	44
3.1.1.2.	Medidas de dispersión	45
3.1.1.3.	Medidas de posición no centrales (cuantiles)	46
3.1.1.4.	Medidas de dispersión relativas	46
3.1.1.5.	Medidas de forma	47
3.1.1.6.	Estandarización de una distribución de frecuencias	48
3.2.	HERRAMIENTAS GRÁFICAS	48
3.2.1.	Histograma de frecuencias	48
3.2.2.	Diagrama de barras	49
3.2.3.	Diagrama de sectores	49
3.2.4.	Diagrama de dispersión	49
3.2.5.	Diagrama de Caja y Bigotes	49
3.2.6.	Diagrama de la probabilidad normal	51
3.3.	ANALISIS DE REGRESION SIMPLE (DOS VARIABLES)	51
3.3.1.	Método de mínimos cuadrados	52
3.3.1.1.	Introducción	52
3.3.1.2.	Método de mínimos cuadrados	55
3.3.1.3.	Modelo de regresión lineal simple	56
3.3.1.4.	Supuestos	57
3.3.1.5.	Bondad del ajuste. Coeficiente de determinación r^2	59

CAPITULO IV ELABORACION BASE DE DATOS

61

4.1.	GENERALIDADES	61
4.2.	MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACION DE LOS HORMIGONES REGISTRADOS EN LA BASE DE DATOS	67
4.3.	CLASIFICACION BASE DE DATOS	69
4.3.1.	Hormigones confeccionados con cementos alta resistencia	69
4.3.2.	Hormigones confeccionados con cementos corrientes	71

CAPITULO V ELABORACION FORMULA EMPIRICA DE PREDICCION

74

5.1.	GENERALIDADES	74
5.2.	FORMULA DE PREDICCION PARA HORMIGONES CONFECCIONADOS CON CEMENTOS DE ALTA RESISTENCIA	75
5.2.1.	Ajuste de la curva	80
5.2.2.	Análisis gráfico de los residuos	82

5.3.	FORMULA DE PREDICCIÓN PARA HORMIGONES CONFECCIONADOS CON CEMENTOS CORRIENTES	86
5.3.1.	Ajuste de la curva	89
5.3.2.	Análisis gráfico de los residuos	91
5.4.	RESUMEN	95
5.5.	COMPARACIÓN DE LOS VALORES OBSERVADOS V/S LOS VALORES PREDECIDOS POR LAS FORMULAS	95
5.5.1.	Hormigones confeccionados con cemento alta resistencia	95
5.5.2.	Hormigones confeccionados con cementos corrientes	99

CAPITULO VI FORMULAS DE PREDICCIÓN MAS USADAS EN CHILE

6.1.	FÓRMULA DE ROS	103
6.1.1.	Contrastación con base de datos de la fórmula de Ros	105
6.2.	FÓRMULA DE MOISES PIÑEIRO	109
6.2.1.	Contrastación de la base de datos con la fórmula de Moisés Piñeiro	109

CAPITULO VII ANALISIS DE RESULTADOS

CAPITULO VIII CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXO EN FORMATO DIGITAL

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.-	Cementos comerciales en Chile	10
Cuadro 2.-	Valores límites de sustancias nocivas y los efectos de éstas (NCh 1498.Of82)	17
Cuadro 3.-	Elementos utilizados en la fabricación de hormigón premezclado	31
Cuadro 4.-	Clasificación de los cementos más usados en la Provincia de Valdivia	68

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.-	Especificación en el nombre del hormigón según requerimientos	32
Figura 2.-	Etapas de transición del hormigón fresco a hormigón endurecido	35
Figura 3.-	Correspondencia entre la resistencia y la relación agua/cemento del hormigón	38

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.-	Desarrollo de resistencia en el tiempo, expresada como porcentaje de resistencia a los 28 días	39
Gráfico 2.-	Box-and-Whisker Plot	50
Gráfico 3.-	Normal Probability Plot	51
Gráfico 4.-	Barchart para Ubicación Obra	65
Gráfico 5.-	Barchart para ubicación Obra (modificado)	66
Gráfico 6.-	Barchart para las comunas según empleo hormigón	66
Gráfico 7.-	Barchart para tipo de cementos de alta resistencia	69
Gráfico 8.-	Piechart para empleo hormigón (c. alta resistencia)	70
Gráfico 9.-	Barchart para tipo de hormigón (c. alta resistencia)	70
Gráfico 10.-	Barchart para tipo hormigón (c. alta resistencia) según su empleo	71
Gráfico 11.-	Barchart por clases de cementos corrientes	72
Gráfico 12.-	Piechart para empleo de hormigón (c. corrientes)	72
Gráfico 13.-	Barchart por tipos de hormigón (c. corrientes)	73
Gráfico 14.-	Barchart para tipo hormigón (c. corriente) según empleo	73
Gráfico 15.-	Diagrama de dispersión R_{28} v/s R_7 (kg/cm^2)	75
Gráfico 16.-	Diagrama de dispersión del porcentaje obtenido a los 7 días de edad	78
Gráfico 17.-	Box-and-Whisker Plot de los porcentajes	79
Gráfico 18.-	Diagrama de dispersión de R_{28} v/s R_7 (modificado)	79
Gráfico 19.-	Ajuste del modelo IV a los datos	80
Gráfico 20.-	Residual Plot	82
Gráfico 21.-	Residual Plot	84
Gráfico 22.-	Residual Plot	84
Gráfico 23.-	Normal Probability Plot	85
Gráfico 24.-	Gráfico de dispersión R_{28} v/s R_7 (kg/cm^2)	86
Gráfico 25.-	Diagrama de dispersión de R_{28} v/s R_7 (kg/cm^2)	88
Gráfico 26.-	Diagrama de dispersión del porcentaje obtenido a los 7 días de edad	88
Gráfico 27.-	Box-and-Whisker Plot de los porcentajes	89
Gráfico 28.-	Modelo IV ajustado a los datos	90
Gráfico 29.-	Residual Plot	91
Gráfico 30.-	Residual Plot	92
Gráfico 31.-	Residual Plot	93
Gráfico 32.-	Residual Plot	93
Gráfico 33.-	Normal Probability Plot	94
Gráfico 34.-	Histograma de comparación	96
Gráfico 35.-	Diagramas de Box de comparación	96

Gráfico 36.-	Diferencia en la media de la variable observada y la predecida por fórmula elaborada para hormigones confeccionados con cementos de alta resistencia	97
Gráfico 37.-	Histogramas de comparación	99
Gráfico 38.-	Diagramas de Box de comparación	100
Gráfico 39.-	Diferencia en la media de la variable observada y la predecida por fórmula elaborada para hormigones confeccionados con cementos corrientes	101
Gráfico 40.-	Histograma de comparación	106
Gráfico 41.-	Diagramas de Box de comparación	106
Gráfico 42.-	Diferencia en la media de la variable observada y la predecida por fórmula de Ros	107
Gráfico 43.-	Histogramas de comparación	110
Gráfico 44.-	Diagramas de Box de comparación	111
Gráfico 45.-	Diferencia en la media de la variable observada y la predecida por fórmula de Piñeiro	112

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.-	Desarrollo resistencias según edad del hormigón	4
Tabla 2.-	Clasificación del hormigón en grados según resistencia especificada a la ruptura	4
Tabla 3.-	Clasificación hormigón en grados según resistencia especificada a la flexotracción	5
Tabla 4.-	Características especificadas para los cementos Nacionales	10
Tabla 5.-	Proporción de burbujas recomendadas según tamaño máximo del árido	20
Tabla 6.-	Estimación de la fórmula de predicción para los hormigones confeccionados con cementos alta resistencia	98
Tabla 7.-	Estimación de la fórmula de predicción para los hormigones confeccionados con cementos corrientes	102
Tabla 8.-	Valores de las constantes a y b, según su plasticidad	104
Tabla 9.-	Clasificación de las consistencias de los asientos medidos según el cono de Abrams	104
Tabla 10.-	Estimación de la fórmula de Ros	108
Tabla 11.-	Fórmulas propuestas por Moisés Piñeiro	109
Tabla 12.-	Estimación de la fórmula de Piñeira	112
Tabla 13.-	Porcentaje de muestras en cada banda de error. (total muestras 1352)	113
Tabla 14.-	Porcentaje de muestras en cada banda de error. (total muestras 731)	113
Tabla 15.-	Porcentaje de muestras de la base de datos, encada banda de error	115
Tabla 16.-	Porcentaje de muestras en cada banda de error	115
Tabla 17.-	Porcentaje de muestras en cada banda de error. (total muestras 731)	116

RESUMEN

Este trabajo propone una fórmula empírica, cuyo objetivo es predecir o estimar la resistencia a la compresión que tendrá a los 28 días de edad el hormigón, basado en la resistencia obtenida a los 7 días de edad. Esta fórmula puede aplicarse a los hormigones confeccionados en la Provincia de Valdivia como también a aquellos de las zonas donde se presenten similares condiciones tanto ambientales como características físico – química de los componentes.

La elaboración de la fórmula empírica propuesta, se hizo a través de un minucioso procesamiento de los datos usando métodos gráficos y estadísticos.

La base de datos fue confeccionada con 7.626 probetas cúbicas certificadas de hormigón, en moldes de 200 mm de arista, extraídas de obras realizadas en la provincia durante los últimos cinco años y que fueron obtenidas de un laboratorio oficial de control de calidad autorizado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

ABSTRACT

The aim of this research is to state an empirical formula to predict or to estimate the 28-day concrete compression strength based on the resistance obtained from samples taken at the seven days. This formula can be used on concrete built in the province of Valdivia as well as on that one built in places with similar environmental conditions and also alike physical and chemical characteristics of the components.

The procedure to obtain this empirical proposal was a detailed work of the data using statistics and graphics methodology.

The data was based on 7.626 certified concrete test pieces, in molds of 200 mm of edge. They were obtained from samples of projects done in the province of Valdivia during the last five years and were gotten from an official quality control laboratory authorized by the Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

INTRODUCCION

Desde el instante en que el agua entra en contacto con el cemento en el interior del hormigón, comienza un proceso físico-químico que lo hace endurecer progresivamente, pasando desde el estado fresco al estado endurecido. Esto permite al hormigón adquirir capacidad para soportar esfuerzos y, en consecuencia, intervenir como componente de elementos estructurales. Este efecto se conoce como *Resistencia Mecánica a la Compresión*, y constituye una de las propiedades más importante que poseen los hormigones.

El diseño, control y recepción de obras que utilizan este material, se basan principalmente en la resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días de edad.

El control de los hormigones tiene por objeto saber si se está cumpliendo con la calidad potencial con que fue diseñado el hormigón. En la actualidad, el desarrollo de tecnologías ha traído consigo un aumento de la velocidad de avance en las obras de construcción, en consecuencia el tiempo de avance versus los costos de la obra, hacen que la edad de 28 días sea poco práctica para el control, debido a que si se obtienen resistencias anormalmente bajas al momento de la inspección, las decisiones que se puedan tomar a esa altura, donde el avance en la construcción ha sido considerable, sólo traerá como resultados el atraso de la obra e irremediamente el aumento de los costos.

La situación anterior trae como consecuencia que los responsables del control de los hormigones de una obra se apoyen en fórmulas para la temprana proyección de los resultados finales del hormigón a los 28 días. La edad más común para realizar esta estimación es a los 7 días de edad.

Existen diversas propuestas que estiman o predicen la resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días, a través de la resistencia obtenida a los 7 días de edad, que se usan en Chile. Estas propuestas han sido obtenidas sobre la base de hormigones con componentes propios de las zonas donde se realizaron estas investigaciones. Es así, que no siempre pueden representar las características de resistencias de hormigones confeccionados en la comuna de Valdivia. Por esta razón se propuso elaborar una fórmula empírica de predicción de la resistencia a la compresión, que sea representativa de los hormigones que se confeccionan en esta comuna.

Para llevar acabo esta tarea, se confeccionó una base de datos compuestas 8.104 resultados experimentales de resistencia a la compresión de probetas cúbicas de hormigón ensayadas en el Laboratorio de Ensaye de Materiales de la Construcción, L.E.M.C.O. Dichos hormigones fueron utilizados en diversas obras, tanto como de pavimentación como estructurales.

Para la elaboración de la fórmula empírica de predicción de resistencia a la compresión a los 28 días de edad, se realizó un detallado y acucioso proceso de ordenamiento y clasificación de los datos, para su posterior análisis sobre la base de herramientas gráficas y estadísticas, de las cuales se obtuvo una fórmula de predicción de fácil aplicación y muy buena precisión, que entrega resultados más representativos de los hormigones de la zona en comparación con las fórmulas que se conocen y usan en Chile.

OBJETIVOS

- Proponer una Fórmula Empírica, cuyo objetivo sea predecir la resistencia a la compresión que tendrá el hormigón a los 28 días de edad, a partir de la resistencia obtenida a los 7 días de edad, aplicados a los hormigones confeccionados en la Comuna de Valdivia.
- Hacer una comparación entre la fórmula propuesta por la Memoria de Título y las fórmulas o propuestas de predicción de resistencia más utilizadas en la zona o el país.

ESTRUCTURA DE LA MEMORIA DE TITULO

La Memoria de Título consta de 8 capítulos. Los tres primeros, constituyen el resultado de un extenso estudio bibliográfico, que componen la base sobre la cual se desarrolla esta memoria. En el capítulo I, se exponen los aspectos más relevantes de la tecnología del hormigón, que son los necesarios para la evaluación y solución de los problemas que habitualmente se presentan al trabajar con este material. En el capítulo II, se profundiza en la característica principal del hormigón, es decir, en su resistencia a la compresión. Aquí, se exponen los principales factores que influyen en el desarrollo de esta capacidad, además de todo lo referente a la ejecución del ensayo de compresión de las probetas de hormigón. En el capítulo III, se describen las principales herramientas estadísticas y gráficas utilizadas en el manejo de los datos obtenidos del laboratorio, además, se describe el método utilizado para la obtención de la fórmula empírica. Sobre la base de estos tres capítulos, se puede comprender y trabajar en su totalidad, con los datos obtenidos del laboratorio.

Los capítulos IV y V, son los capítulos principales, donde se desarrolla el objetivo de esta memoria. En el capítulo IV, se describe el proceso de la elaboración de la base de datos, elemento fundamental en la obtención de la fórmula empírica, además, se exponen los principales atributos e informaciones que se puede deducir de ellos y su clasificación. En el capítulo V, se desarrolla la obtención de la fórmula empírica de predicción, aplicando los métodos descritos en el capítulo III, a través de la utilización del programa seleccionado para este fin.

Los capítulos VI y VII, tienen por finalidad evaluar la precisión de la fórmula obtenida por esta memoria. En el capítulo VI, se describen las principales fórmulas de predicción usadas en Chile y se contrastan con la base de datos elaborada. En el capítulo VII, se realiza el análisis de los resultados obtenidos en el capítulo V y VI y se comparan.

Finalmente el capítulo VIII expone las conclusiones de los análisis realizados.

CAPITULO I HORMIGON

En el presente capítulo se utilizará como referencia principal el “Manual del Hormigón” del Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, debido a que es la única fuente válida basada en las Normas Chilenas, para desarrollar materias relacionadas al Hormigón.

Cabe destacar que todo el material chileno consultado se basaba textualmente en este Manual del Hormigón. El resto del Material consultado están escritos sobre la base de Normas Extranjeras que no se aplican al país.

1.1. GENERALIDADES

1.1.1. Antecedentes históricos

“El hormigón, en su concepto más general de masa constituida por materiales pétreos ligados con productos aglomerantes, fue utilizado por el hombre desde los albores de la civilización en la construcción de diversas obras, muchas de las cuales causan admiración, aún en nuestros días por su magnitud, belleza, resistencia y extraordinaria durabilidad.” (Zabaleta, 1992, p.7)

“El desarrollo histórico de su tecnología no es aún suficientemente conocido, debido a que los avances tecnológicos logrados en las diversas épocas por las distintas civilizaciones se han perdido al desaparecer o decaer éstas.” (Zabaleta, 1992, p.7)

La tecnología del hormigón fue lentamente desarrollándose desde el año 7000 antes de Cristo hasta los días de hoy.

El primer aglomerante conocido fue aparentemente la arcilla, utilizado en las construcciones babilónicas y asirias. Posteriormente se usó el yeso en las construcciones egipcias y finalmente los griegos emplearon aglomerantes sobre la base de cales grasas simples.

Los romanos fueron los que más aportaron al desarrollo tecnológico del hormigón. Ellos lograron obtener un hormigón semejante al que conocemos hoy (siglo I antes de Cristo). Su tecnología se perdió al decaer el Imperio y ser invadido por otros pueblos.

La actual etapa de desarrollo tecnológico del hormigón, comenzó en el siglo XIX con el redescubrimiento del hormigón a través de la obtención, en Francia e Inglaterra, del cemento como ligante hidráulico, complementado a comienzos del presente siglo con la utilización, en Italia, de los cementos puzolánicos.

El cemento fue desarrollado a partir de las investigaciones del francés Vicat en 1818 y del escocés Aspadin (constructor de Leeds), quien lo patentó en 1824 con el nombre de cemento Portland, por la denominación romana del hormigón y por la similitud del producto obtenido con las rocas de la isla de ese nombre.⁽¹⁾

⁽¹⁾ ZABALETA, Hernán. Compendio de Tecnología del Hormigón. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, 1992. 144 p.

La tecnología del hormigón en esta etapa adquirió de inmediato un extraordinario ritmo de perfeccionamiento debido al esfuerzo sistemático de investigación aplicada desde el siglo pasado.⁽²⁾

La primera aplicación del hormigón armado se registra en 1850, año en que Lambot construyó una pequeña barca de hormigón reforzado con barras de acero.

El primer texto sobre hormigón armado lo publicó en 1887 Wayss, en el cual se esbozan por primera vez los conceptos para el diseño con este material.

La construcción de las grandes presas americanas en la década del treinta, hace necesario profundizar los conocimientos relativos a los problemas térmicos en el hormigón colocado en grandes masas. Por este motivo, principalmente en EE.UU., en el Bureau of Reclamation, se efectúan profundos estudios para determinar la influencia de los distintos factores que condicionan estos procesos y los procedimientos para controlar sus efectos, especialmente en la fisuración del hormigón.⁽³⁾

En la actualidad se han refinado en gran forma los sistemas de análisis, mediante la utilización en computador del método de los elementos finitos.

El empleo de hormigones pre y post-tensados fue impulsado principalmente para la construcción de puentes de grandes luces. La primera idea al respecto se atribuye a Freyssinet, quién, además construyó grandes obras de ingeniería aplicándolo.

La pavimentación de grandes obras de vialidad, en especial las autopistas de alta velocidad de circulación han impulsado el conocimiento del empleo de los hormigones de muy baja fluidez y alta calidad de terminación superficial, y de los equipos de construcción asociados a su uso.

En la actualidad se posee un buen nivel de conocimiento de muchas de las características y propiedades del hormigón, que está posibilitando la construcción de todo tipo de obras necesarias al desarrollo eficiente de la construcción en el mundo. Por otra parte, el creciente impulso de la investigación en esta materia permite prever un continuo perfeccionamiento de su tecnología para adaptarse a las necesidades del futuro.

La primera aplicación registrada del uso del cemento en nuestro país corresponde a la infraestructura del puente ferroviario sobre el río Maipo en 1856, en la que se empleó cemento importado.⁽⁴⁾

⁽²⁾ ZABALETA, Hernán. Compendio de Tecnología del Hormigón. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, 1992. 144 p.

⁽³⁾ *Ibíd.*

⁽⁴⁾ *Ibíd.*

El empleo del hormigón armado se inicia en 1906 con la construcción, no terminada por un accidente durante su ejecución, de una estructura en albañilería armada, denominada “Casa Prá”. Otro hito importante lo constituye la apertura en Chile, a mediados de 1906, de la Fábrica de Cemento Melón, la primera de Sudamérica.

El reemplazo del cemento importado por nacional permite que el empleo del hormigón se extienda y se diversifique, construyéndose posteriormente numerosas obras, pudiendo decirse que, a la fecha, constituye el principal material de construcción en nuestro país.

Una gran contribución en la difusión del uso del hormigón en las obras, principalmente en las obras de edificación, pavimentación y urbanización, lo constituye sin duda el creciente empleo del Hormigón Premezclado, inducido principalmente por las garantías de calidad, costo y simplificación constructiva que ofrece.⁽⁵⁾

1.1.2. Definición⁽⁶⁾

El hormigón es un material que está constituido básicamente por los áridos y la pasta de cemento, eventualmente se agregan aditivos y adiciones, en proporciones adecuadas que, al fraguar y endurecer, adquiere resistencia.

Los áridos son los materiales pétreos compuestos de partículas duras, de forma y tamaño estable. Habitualmente se dividen en dos fracciones: grava y arena.

La pasta de cemento es el aglomerante del hormigón, y está formada por el cemento y el agua.

Los áridos, el cemento y el agua se mezclan juntos para constituir una masa plástica y trabajable, que permite ser moldeada en la forma que se desee.

El cemento y el agua se combinan químicamente por un proceso denominado hidratación, de la cual resulta el fraguado del hormigón y su endurecimiento gradual; este endurecimiento puede continuar indefinidamente bajo condiciones favorables de humedad y de temperatura, con un incremento de la capacidad resistente del hormigón. Se supone y acepta que el hormigón ha alcanzado su resistencia de trabajo al cabo de 28 días, y es por eso que normalmente las exigencias de resistencia se especifican y verifican a esa edad, como se refleja en la tabla 1. En realidad, encontrándose en condiciones favorables, los hormigones siguen incrementando su resistencia a medida que aumenta su edad, aproximadamente en los valores que se indican a continuación en promedio, para cementos portland y cementos con adición (puzolánicos o siderúrgicos).

⁽⁵⁾ ZABALETA, Hernán. Compendio de Tecnología del Hormigón. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, 1992. 144 p.

⁽⁶⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

Tabla 1.- Desarrollo Resistencias según edad del Hormigón.

Edad	Portland	con Adición
28 días	100%	100%
90 días	110% - 120%	120% - 135%
1 año	120% - 135%	130% - 160%

Fuente: Manual del Hormigón, 1988.

1.1.3. Clasificaciones del hormigón

Se fabrica una gran variedad de hormigones, los que se pueden clasificar atendiendo a diversas consideraciones.

a) Según resistencia a compresión.

La Norma NCh 170.Of85 "*Hormigón- Requisitos generales*", establece una clasificación para el hormigón en grados según sea la resistencia especificada a la ruptura por compresión a los 28 días, medida en probetas cúbicas de 20 cm de arista, según se expresa en tabla 2.

Tabla 2.- Clasificación del hormigón en grados según resistencia especificada a la ruptura.

Grados del Hormigón	Resistencia Especificada, f_c	
	MPa	(Kg/cm²)
H 5	5	(50)
H 10	10	(100)
H 15	15	(150)
H 20	20	(200)
H 25	25	(250)
H 30	30	(300)
H 35	35	(350)
H 40	40	(400)
H 45	45	(450)
H 50	50	(500)

Fuente: Manual del Hormigón, 1988.

b) Según resistencia a flexotracción.

La Norma Chilena NCH 170.Of85 también establece una clasificación del hormigón en grados según su resistencia especificada a la flexotracción a 28 días, medida en probetas prismáticas de 15 x 15 cm de sección y 50 a 60 cm de longitud. Como puede observarse en la tabla 3.

Tabla 3.- Clasificación del hormigón en grados según resistencia especificada a la flexotracción.

Grados del Hormigón	Resistencia Especificada, f_t	
	MPa	(Kg/cm ²)
HF 3	3,0	(30)
HF 3,5	3,5	(35)
HF 4	4,0	(40)
HF 4,5	4,5	(45)
HF 5	5,0	(50)
HF 5,5	5,5	(55)
HF 6	6,0	(60)

Fuente: Manual del Hormigón, 1988.

- c) Según presencia de armaduras de refuerzo.
- Hormigón simple = sin armaduras.
 - Hormigón armado = con armaduras.
- d) Según su densidad aparente.
- Hormigón liviano o ligero. Estos hormigones pueden ser de relleno o aislante, o bien estructurales. Sus densidades aparentes varían entre 300 y 1.800 kg/m³.
 - Hormigón corriente. Su densidad aparente varía entre 2.000 y 2.800 kg/m³. Su resistencia a compresión puede superar los 700 kg/cm².
 - Hormigón pesado. Su densidad aparente varía entre 3.000 y 4.500 kg/m³. Su resistencia a compresión se puede asimilar a la del hormigón corriente.
- e) Otros hormigones.
- También existen otros hormigones más particulares: con fibras (metálicas o no metálicas), con azufre, con polímeros, etc.

1.1.4. Requisitos generales del hormigón

Los requisitos que debe cumplir todo hormigón son:

- a) Docilidad. Llamada también trabajabilidad, consiste en la aptitud que posee para ser transportado y colocado sin que segregue, y de ser compactado adecuadamente.
- b) Resistencia. Al endurecer debe cumplir los requisitos de resistencia exigidos para soportar la acción de las cargas.
- c) Durabilidad. Debe permanecer inalterable en el tiempo, soportar la abrasión, la humedad, ambiente químicamente agresivos, heladas, etc.
- d) Economía. Aunque los tres requisitos anteriores son fundamentales y hay que obtenerlos, también es necesario que estas propiedades se logren a un costo razonable.

1.1.5. Características particulares del hormigón⁽⁷⁾

El hormigón presenta algunas características que es necesario conocer para prevenir los problemas que pueden originar:

- Resistencia a la tracción. Aun cuando el hormigón en general se diseña para resistir esfuerzos de compresión, frecuentemente debe trabajar solicitado a tracción como ocurre en vigas, losas, pavimentos, etc.

El hormigón no tiene capacidad para soportar esos esfuerzos, ya que su resistencia a tracción varía en el rango de 1/6 a 1/10 de su resistencia a compresión. Si se excede su capacidad resistente a tracción por cargas o retracciones, el elemento falla, agrietándose. Para contrarrestar estos esfuerzos, las partes de estructuras que estarán sometidas a tracción deben ser reforzadas con barras o mallas de acero, de modo que éstas tomen los esfuerzos de tracción (hormigón armado).

- Cambios volumétricos por efectos térmicos y de humedad. Al igual que otros materiales, el hormigón se dilata y contrae con los cambios de temperatura. Los cambios de humedad producen efectos similares; en estado endurecido, si se humedece se expande, y si se seca se contrae. Estos movimientos de la masa originan considerables esfuerzos, sobre todo de tracción, los que para ser controlados obligan a disponer las denominadas juntas de dilatación y contracción.
- Impermeabilidad. Es particularmente importante en el hormigón armado donde se confía en el recubrimiento de las armaduras para prevenir su oxidación; también lo es en el caso de elementos de hormigón que estarán con o bajo agua y en ambientes agresivos. La impermeabilidad se incrementa con una baja relación agua/cemento y una dosificación y compactación adecuados.

1.1.6. Funciones de los materiales componentes

- Pasta de cemento. Es el componente activo del hormigón y tiene dos funciones principales:
 - a) Llenar los huecos entre partículas del árido, aglomerándolas. Cuando el hormigón está fresco la pasta hace las veces de lubricante disminuyendo el roce entre partículas, y brinda cohesión a la mezcla. Al endurecer, la pasta tapona los huecos entre los granos de los áridos dando impermeabilidad al hormigón.
 - b) Proporcionar resistencia al hormigón endurecido, dependiendo:
 - De la razón agua/cemento
 - De las características del cemento empleado

⁽⁷⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

- Del curado del hormigón, tratamiento que favorece la combinación química entre el cemento y el agua. Este proceso requiere tiempo, temperaturas favorables y presencia de humedad.
- Áridos. Son el componente inerte del hormigón y tiene dos funciones principales:
 - a) Proveer una masa de partículas apta para resistir la acción de cargas aplicadas, la abrasión, el paso de la humedad y la acción climática.
 - b) Reducir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado y endurecimiento, y de los cambios de humedad de la pasta de cemento.

1.2. MATERIALES PARA FABRICAR HORMIGON

1.2.1. Cemento ⁽⁸⁾

1.2.1.1 Generalidades

El cemento es un polvo finísimo de color gris que mezclado con agua forma una pasta que endurece tanto bajo agua como al aire. Por la característica de endurecer con y bajo agua, el cemento es definido como un conglomerante hidráulico. La velocidad del endurecimiento depende de la temperatura.

El cemento se obtiene mediante un proceso de fabricación que utiliza principalmente dos materias primas: una caliza, con un alto contenido de cal en forma de óxidos de calcio, y un componente rico en sílice, constituido normalmente por arcilla o eventualmente por una escoria de alto horno. Estos componentes son mezclados en proporciones adecuadas y sometidos a un proceso de fusión incipiente (calcinación), en un horno rotatorio a una temperatura entre los 1.400 – 1.500°C, del cual se obtiene un material granular denominado clínquer portland.

El clínquer es la materia principal del cemento y es la que le da su propiedad hidráulica. Su hidraulicidad se desarrolla en forma casi instantánea por lo cual para regular su uso a tiempos adecuados en las obras se le somete a molienda mediante molinos de bolas hasta convertirlo en el polvo finísimo ya mencionado, adicionándose en esta etapa una proporción de mineral de yeso de alrededor de un 5% de su peso, destinado a regular el proceso de fraguado de la pasta de cemento, la que de otra manera endurecería en forma casi instantánea.

El cemento así obtenido con la mezcla aproximada de 95% de clínquer y 5% de mineral de yeso se denomina ***Cemento Portland clásico***.

Durante la molienda se puede adicionar otros productos naturales o artificiales, constituyendo así los ***Cementos Portland con Adiciones o Especiales***, los que junto con mantener las propiedades típicas del Portland puro (fraguado y resistencia), poseen, además, otras cualidades especialmente

⁽⁸⁾ INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales. NCH148: Of68. Santiago, Chile, 1968. 8 p.

relacionadas con la durabilidad, resistencia química y otras. Entre las adiciones más conocidas y utilizadas están las puzolanas, las cenizas volantes y las escorias básicas granuladas de alto horno.

Estas adiciones presentan una reactividad química potencial, que se activa durante la hidratación del clínquer a temperatura ambiente. Así, las puzolanas y cenizas volantes reaccionan con la cal hidratada liberada durante la hidratación de los componentes activos del clínquer. En cambio, en el caso de las escorias este efecto se produce porque la cal hidratada liberada desencadena la reacción de los componentes de la escoria, similares a los existentes en el clínquer.

La Norma Chilena NCh161.Of68 fija los requisitos que deben cumplir las puzolanas, en tanto que las escorias están definidas en la Norma Chilena NCh148.Of68, la que además establece las proporciones máximas en que se pueden mezclar con el clínquer portland.

Según la Norma Chilena NCh148.Of68 “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales”, los cementos con menos de un 30% de puzolanas pertenecen a la clase de **Portland Puzolánicos**; si el agregado de puzolana está comprendido entre 30% - 50% en peso del total del cemento, los cementos pertenecen a la clase de **Puzolánicos**.

Los cementos con puzolanas tienen buenas propiedades de resistencia química e impermeabilidad. Tienen bajo calor de hidratación, lo que puede ser una ventaja en algunos casos, como ocurre en la construcción de grandes masas de hormigón. Son cementos más lentos en general que los portland, aunque eso lo compensan con mayor finura de molienda. Son más sensibles al calor y al frío, aumentando o disminuyendo, respectivamente, la velocidad de endurecimiento. La puzolana tiene además la ventaja de inhibir la reacción entre el árido y los óxidos alcalinos del cemento.

Los cementos que llevan una adición de escoria de alto horno de hasta un 30% en peso total del cemento se denominan **Portland Siderúrgicos**, y si la proporción de escoria de alto horno es entre 30% - 75% pertenece a los cementos denominados **Siderúrgicos**.

La escoria de la fabricación del hierro en el alto horno es una combinación de los componentes arcillosos del mineral de hierro con la caliza que se emplea como fundente. Ésta tiene similares componentes, reacciones y condiciones de temperatura de elaboración que las del clínquer, así es que no tiene nada de extraño que sirva de alguna manera para fabricar cemento. La escoria granulada tiene propiedades conglomerantes, pero las desarrolla lentamente; necesita un activador, cal o cemento, para acelerar el fraguado o endurecimiento.

Las propiedades de los cementos siderúrgicos son similares en general a las de los cementos puzolánicos, aunque varían en intensidad. En general la escoria da más resistencia que la puzolana y es algo menor su beneficio en cuanto a la resistencia a los ataques químicos.

1.2.1.2. Fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento⁽⁹⁾

“En general, se llaman conglomerantes hidráulicos aquellos productos que, amasados con el agua, fraguan y endurecen tanto expuestos al aire como sumergidos en agua, por ser estables en tales condiciones los compuestos resultantes de su hidratación.”(Montoya, 2000, p.16)

Las reacciones de hidratación ya empiezan a ocurrir durante el almacenamiento del clínquer, durante la molienda del clínquer con el yeso y durante el almacenamiento del cemento. Esta anticipada hidratación puede inclusive cambiar las características físicas del cemento tanto en la elaboración del cemento, por lo que hay que tener especial cuidado con las exposiciones del cemento tanto en su elaboración así como en su almacenamiento. La mayor hidratación y cambios significativos en las características físicas se lleva a cabo durante la reacción cemento-agua en la mezcla del hormigón.

El cemento al ser mezclado con agua forma una pasta, que tiene la propiedad de rigidizarse progresivamente hasta constituir un sólido de creciente dureza y resistencia.

La finura del cemento es su característica física principal, ya que como las reacciones de hidratación se producen en la superficie de los granos, sucede que cuanto más pequeños son éstos, es más rápido el desarrollo de la resistencia. Así, un cemento de alta resistencia inicial puede obtenerse con solo moler más fino el mismo clínquer de un cemento corriente. Este aumento de resistencia es notable a edades tempranas; pero con el tiempo los cementos portland de distinta finura tienen igual resistencia. Esto quiere decir que el tipo de cemento (corriente o alta resistencia) es poco significativo para edades mayores a 6 meses, sin embargo, condiciona la resistencia del hormigón a edades tempranas.

La hidratación es un proceso complejo que se alarga en el tiempo y se manifiesta por un progresivo espesamiento y rigidización de la mezcla. Aunque el proceso es uno solo, se acostumbra denominarlo con dos nombres típicos:

- a) el fraguado, que es el espesamiento progresivo de la mezcla cemento-agua, y que se subdivide en dos etapas, según un procedimiento normalizado:
 - Fraguado inicial, determinado por un grado de penetración de la aguja de Vicat en la pasta.
 - Fraguado final, determinado por la oposición de la pasta a la penetración de la aguja de Vicat.
- b) el endurecimiento, que es la rigidización progresiva de la pasta que se manifiesta por el desarrollo de una capacidad mecánico-resistente (resistencia del cemento).

⁽⁹⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

Otras características que definen la calidad de un cemento son:

- la finura, expresada como superficie específica (Blaine) medida en cm^2/gr
- la expansión, expresada como aumento de longitud de una probeta de 25 x 25 x 250mm después de someterla a presión y temperatura en autoclave.

1.2.1.3. Clasificación de los cementos fabricados en Chile.

La norma NCh 148. Of68 “ *Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales*”, establece dos clasificaciones para los cementos, según su composición y resistencia.

- a) Según su composición: (en el siguiente cuadro 1, se presenta esta clasificación aplicada a los cementos fabricados en Chile)

Cuadro 1.- Cementos Comerciales en Chile
(De acuerdo al Laboratorio Nacional de Vialidad y el Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón)

AGREGADO	DENOMINACION INN*	COMPOSICION	DENOMINACION COMERCIAL	GRADO
NO	Portland	Clínquer	Super Melón	Alta Resistencia
			Polpaico Portland	Alta Resistencia
Puzolana	Portland Puzolánico	Clínquer y hasta 30% de puzolana	Melón Especial	Corriente
			Polpaico Especial	Corriente
			Melón Extra	Alta Resistencia
			Polpaico 400	Alta Resistencia
			Polpaico ARI	Alta Resistencia
			Inacesa Alt. Resist.	Alta Resistencia
	Puzolánico	Clínquer y 30% a 50% de puzolana	Inacesa Especial	Corriente
Escoria de Alto Horno	Portland Siderúrgico	Clínquer y hasta 30% de Escoria		
	Siderúrgico	Clínquer y entre 30% y 50% de Escoria	Bío Bío Especial	Corriente
			Bío Bío Alt. Resist.	Alta Resistencia

*Según el Instituto Nacional de Normalización.

- b) Según su resistencia: Como se puede observar en la tabla 4.

Tabla 4.- Características Especificadas para los Cementos Nacionales.

GRADO	TIEMPO FRAGUADO		RESISTENCIAS MINIMAS			
			COMPRESION		FLEXION	
	Inicial (mín)	Final (máx)	7 días (Kgf/cm ²)	28 días (Kgf/cm ²)	7 días (Kgf/cm ²)	28 días (Kgf/cm ²)
Corriente	60 min	12 h	180	250	35	45
Alta Resistencia	45 min	10 h	250	350	45	55

Fuente: Manual del Hormigón, 1988.

1.2.2. Áridos

1.2.2.1. Generalidades

Por razones económicas y de estabilidad físico-química, es conveniente que la pasta de cemento sea sustentada por un esqueleto inerte. Este papel es desempeñado por los áridos, los que ocupan entre 65 y 75 % del volumen total del hormigón.

Los áridos tienen dos funciones principales:

- a) Proveer una masa de partículas apta para resistir la acción de cargas aplicadas, la abrasión, el paso de la humedad y la acción climática.
- b) Reducir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado y endurecimiento, y de los cambios de humedad de la pasta de cemento.

Los áridos son partículas granulares de material pétreo de tamaño variable. Este material se origina por fragmentación de las distintas rocas de la corteza terrestre, ya sea en forma natural o artificial. En este último caso actúan los procesos de chancado utilizados en las respectivas plantas de áridos.

En general, la arena y la grava se extraen directamente de los lechos o las riberas de los ríos, en cuyo caso predominan los elementos redondeados, en tanto que las rocas mayores deben ser procesadas antes de poder incorporarlas como agregados. El material que es procesado, corresponde principalmente a minerales de caliza, granito, dolomita, basalto, arenisca, cuarzo y cuarcita.

“En términos generales, los áridos se pueden definir como el conjunto de fragmentos de materiales pétreos suficientemente duros, de forma estable e inerte en los cementos y mezclas asfálticas, que se emplean en la fabricación del mortero y del hormigón y bases estabilizadas cumpliendo una serie de requisitos dados en las normas.” (Ebensperger, 2003, p. 26)

Como fuente de abastecimiento se puede distinguir las siguientes situaciones:

Bancos de sedimentación: son los bancos construidos artificialmente para embancar el material fino-grueso que arrastran los ríos.

Cauce de río: corresponde a la extracción desde el lecho del río, en los cuales se encuentra material arrastrado por el escurrimiento de las aguas.

Pozos secos: zonas de antiguos rellenos aluviales en valles cercanos a ríos.

Canteras: es la explotación de los mantos rocosos o formaciones geológicas, donde los materiales se extraen usualmente desde cerros mediante tronaduras y perfilajes. Las extracciones pueden ser de índole artesanal, con equipos rudimentarios, o mecanizadas con maquinarias que permiten el manejo de grandes volúmenes. (Ebensperger, 2003, p. 26)

Los agregados pétreos de río o de pozo se caracterizan por su forma redondeada, y reciben según su tamaño el nombre de ripio y arena. Los agregados procedentes de cantera tienen formas irregulares y aristas vivas. Según las dimensiones de sus elementos se les conoce como: chancado, gravilla gruesa, gravilla fina o polvo de cantera. Los agregados artificiales son en la mayoría de las ocasiones desechos industriales. (Ebensperger, 2003, p. 28)

La calidad del árido es de suma importancia, ya que le corresponden aproximadamente tres cuartas partes del volumen del hormigón. Debe darse gran atención a su elección y control, ya que de sus características dependerán la docilidad del hormigón fresco, la resistencia del hormigón endurecido, la durabilidad de las estructuras y la economía de las mezclas.

Los áridos deben estar constituidos por partículas duras, de forma y tamaño estables y deben estar limpios y libres de terrones, partículas blandas o laminadas, arcillas, impurezas orgánicas, sales y otras sustancias que por su naturaleza o cantidad afecten la resistencia o durabilidad de morteros y hormigones, de acuerdo con los valores límites que se especifican en la Norma Chilena NCh 163.Of79 “*Áridos para morteros y Hormigones-Requisitos Generales*”.

En un principio, el agregado pétreo se le consideró un material inerte, no costoso, disperso en la pasta de cemento para producir un gran volumen de hormigón. En realidad, el agregado no es inerte, pues sus propiedades físicas, térmicas y en ocasiones, químicas, pueden influir en el desempeño del hormigón, por ejemplo, mejorando su durabilidad y estabilidad de volumen sobre los de la pasta de cemento. Desde el punto de vista económico, es ventajoso emplear una mezcla con el mayor contenido posible de agregado y el menor posible de cemento, aunque el costo debe balancearse con las propiedades deseadas del hormigón en estado fresco y endurecido. (Neville y Brooks, 1998)

En Chile, los materiales que más se usan son los de río, debido a su buena calidad, su económica extracción y a su proximidad a los centros de consumo. Los materiales de pozo, extraídos de lechos de ríos fósiles, suelen ser de calidad un poco inferior a causa de su contaminación con los suelos superficiales; en este caso, los elementos del agregado están recubiertos con una fina pero firme película de arcilla, muy difícil de destruir y peligrosa en los hormigones.

1.2.2.2. Condiciones de los Áridos.⁽¹⁰⁾

Para su integración en el hormigón, los áridos deben cumplir ciertas condiciones, las cuales pueden resumirse en tres grupos principales:

a) Condición de docilidad

Se puede definir esta condición como el conjunto de características necesarias para que los áridos al ser incorporados al hormigón le confieran una docilidad adecuada para su uso en obra en estado fresco. Puede subdividirse en:

⁽¹⁰⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

a1) Condición de granulometría

Los áridos se utilizan separados en fracciones cada una de las cuales contiene una gama distinta de tamaños de partículas. La distribución de los porcentajes en peso para cada tamaño de partícula se denomina granulometría del árido. Ésta se determina haciendo pasar una muestra representativa del árido por una serie de tamices ordenados, de abertura decreciente. Los pesos retenidos en cada tamiz se expresan como porcentajes del peso total de la muestra y, finalmente, la granulometría del árido se acostumbra expresarla en porcentajes acumulados que pasan por las mallas de la serie utilizada. Los tamices de los áridos están normalizados en NCh 165. Of77 “Áridos para morteros y hormigones – tamizado y determinación de la granulometría” y se denominan por su abertura en mm, sin embargo, los más usados en la práctica corresponden a la serie normalizada ASTM E11, debido a que éstos se encuentran disponibles en el mercado.

La granulometría de los áridos esta normalizada por NCh 163. Of79, de acuerdo a la definición de la mencionada norma, se designa como arena al árido que pasa en por lo menos un 95% por el tamiz de abertura nominal de 5 mm y grava al árido que es retenido en un 95% por dicha malla.

a2) Condición de contenido de granos finos

El hormigón necesita de un cierto contenido de granos muy finos, de un tamaño inferior a 0.080 mm, para que tenga una adecuada trabajabilidad. Parcialmente este aporte es efectuado por el cemento, el que está normalmente constituido en su casi totalidad por partículas menores de ese tamaño, pero, especialmente hormigones con bajas dosis de cemento, se requiere que también los áridos aporten parte de esas partículas. Sin embargo, un contenido excesivo de ellas puede ser desfavorable, pues obligan a un mayor empleo de agua, interfieren en el proceso de cristalización de la pasta de cemento y dañan la adherencia entre árido y pasta.

Los valores aceptables están establecidos en norma NCh 163. Of79.

a3) Condición de forma de los granos

Una forma regular de los granos de un árido favorece la trabajabilidad del hormigón. Para medir esta condición existen numerosos índices, algunos de los cuales son los siguientes:

- Numero de angularidad = % huecos – 33
- Coeficiente de forma: largo + ancho < 6 x espesor
- Coeficiente volumétrico = $\frac{\text{volumen real partículas}}{\text{volumen esferas circunscritas}}$.

Los valores aceptables están establecidos en norma NCh 163. Of79

a4) Condición de porosidad

La porosidad de un árido está relacionada con la absorción de agua. Una alta porosidad es una característica desfavorable, pues está normalmente asociada a alterabilidad por parte de los agentes atmosféricos; además introduce un factor de variabilidad en el hormigón al dificultar el control de la dosis de agua, debido a que la cantidad de agua absorbida por el árido resulta dependiente de las condiciones de empleo del hormigón en obra.

El procedimiento para determinar la porosidad de los áridos está definida por NCh 1239. Of77 “Áridos – Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arena” y por NCh 1117. EOf77 “Áridos – Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas.”

Por su parte, norma NCh 163. Of 79 establece los límites máximos.

b) Condición de resistencia propia

El árido debe ser capaz de resistir los efectos ambientales y las tensiones internas que le producen las sollicitaciones aplicadas sobre el elemento del cual forma parte. La resistencia de un árido no resulta fácil de medir en forma directa, por lo que se recurre a ensayos directos tales como el ensayo de abrasión, cuya ejecución por el Método de desgaste de la Máquina de Los Angeles está definida por NCh 1369. Of78 “Áridos - Determinación del desgaste de las gravas – Método de la máquina de Los Angeles.”

Las normas regulan también la cantidad de partículas blandas, desmenuzables por presión de los dedos, que puede contener un árido. La determinación respectiva está regulada por NCh 1327. Of77 “Áridos – Determinación de partículas desmenuzables” y los valores máximos admisibles por NCh 163. Of79.

Los áridos nacionales, en general, presentan buenas características de resistencia propia, pues en su mayoría provienen de rocas ígneas de alta dureza, principalmente rocas graníticas. Sin embargo, este aspecto no puede ser descuidado cuando, como sucede con frecuencia en la zona norte de nuestro país, los áridos se obtienen de rocas que han experimentado un cierto grado de alteración.

c) Condición de estabilidad físico-química

Un árido debe ser capaz de resistir las acciones físico-químicas generadas por las condiciones ambientales en las que debe subsistir y de las internas derivadas de su incorporación en el hormigón.

Para la estabilidad química de los áridos deben considerarse los siguientes aspectos: la inalterabilidad ante los compuestos producidos durante el proceso de fraguado de la pasta de cemento y la no incorporación de productos nocivos.

Los áridos pueden contener componentes combinables con los compuestos producidos durante el fraguado, los cuales al reaccionar forman compuestos expansivos, que pueden llegar a desintegrar el hormigón. La reacción más estudiada se denomina reacción álcali-árido, en Chile no se han informado situaciones ciertas de existencia de daños en obras producidos por esta reacción, sin embargo, dada la existencia de partículas de origen volcánico en muchos de ellos, en particular los obtenidos en el curso alto de los ríos, es conveniente, cuando se desea utilizar áridos no conocidos, verificar la potencial existencia de compuestos nocivos.

Por otra parte el árido no debe incorporar en el hormigón productos que puedan alterar el proceso de fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento, como por ejemplo: materia orgánica, contenida principalmente en la arena y las sales solubles en agua adheridas a los áridos.

Para la estabilidad física el árido debe ser capaz de soportar las condiciones ambientales a que va a estar sometido el hormigón. De estas condiciones, las más nocivas son los ciclos alternados de temperatura bajo y sobre 0°C. (hielo-deshielo).

El efecto de estos ciclos de hielo-deshielo está muy relacionado con la porosidad del árido.

En toda obra donde se confeccionen hormigones, el jefe de obra debe contar con el equipo necesario para ensayar el material que recibe, por lo menos, en lo que se refiere a la granulometría, contenido de arcilla y materia orgánica. En el caso en que no se cuente con un equipo adecuado, pueden usarse ciertas impresiones sensoriales inmediatas, como por ejemplo: el olfato; para descubrir contaminación de sustancias orgánicas, el tacto; para comprobar si un agregado está limpio o sucio, como sucede si al descargar una camionada de material, se observa una gran polvareda, que demuestra un alto contenido de arcilla.

En el caso de contratar una empresa de hormigón premezclado para la confección de los hormigones que se colocarán en la obra, será necesario ir de vez en cuando a verificar las pilas de áridos que ellos posean para controlar si se encuentran contaminados por material externo, o no cumplen con las exigencias del proyecto.

El transporte y el almacenamiento de los agregados pétreos son operaciones que requieren especial atención. Cuando no se efectúan en debida forma, se producen segregaciones del

material, con alteración en la granulometría y como consecuencia, problemas de dosificación y calidad de los hormigones.

Se debe medir el contenido de humedad del agregado, especialmente del fino, porque dicho contenido debe ser considerado en la dosificación del agua en el hormigón.

El tamaño, cantidad y naturaleza de los poros afectan la resistencia a compresión del árido y están relacionados con la absorción de agua y con la permeabilidad, influyendo por tanto en la resistencia del hormigón a los ciclos hielo-deshielo, a los ataques químicos y la abrasión, en suma, en su durabilidad.

La humedad libre en la arena produce el esponjamiento, que consiste en un aumento del volumen aparente de un volumen dado de arena, fenómeno que no se presenta en las gravas. El esponjamiento tiene una particular importancia cuando la medición de dosificaciones se hace en volumen. Si no se considera, da como resultado una medida errónea al incorporar una cantidad real de arena menor que la estipulada, lo cual origina hormigones faltos de finos, pedregosos y segregables.

Los áridos deben cumplir con los requisitos generales de acuerdo a la Norma Chilena Nch163.Of.79 “*Áridos para morteros y Hormigones – Requisitos Generales*”.

1.2.3. Agua⁽¹¹⁾

1.2.3.1. Generalidades

El agua desempeña dos roles en su calidad de componente del hormigón:

- Participa en el proceso de hidratación del cemento, el cual no puede tener lugar sin su presencia.
- Otorga la trabajabilidad necesaria al hormigón, siendo determinante para definir su fluidez.

Es, en consecuencia, un componente fundamental del hormigón, ya que su presencia condiciona tanto el desarrollo de las propiedades en su estado fresco como en la etapa de su endurecimiento.

1.2.3.2. Condiciones del Agua

Para su incorporación en el hormigón, el agua debe presentar ciertas características de calidad, las cuales aparecen definidas en NCh 1498. Of82 “*Hormigón – Agua del amasado – Requisitos*”, y pueden resumirse en la forma siguiente:

⁽¹¹⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

- El uso de agua potable está permitido sin necesidad de verificar su calidad, siempre que no se contamine antes de su uso.
- El agua de mar sólo puede utilizarse en la preparación de hormigones de resistencia especificada inferior a H15.
- El agua con contenido de azúcares, en forma de sacarosa o glucosa, no puede ser empleada para la preparación de hormigones.
- Las aguas de origen desconocido deben ser sometidas a análisis químico, debiendo atenerse su composición a los límites señalados en la Norma chilena 1498.Of.82 “ Agua-requisitos Generales”, y que se indican en el Cuadro 2:

Cuadro 2.- Valores Límites de Substancias Nocivas y los Efectos de éstas (NCh 1498. Of82)

Requisitos	Observaciones	Valores Límites
pH		6 a 9.2
Sólidos en Suspensión	Perjudican propiedades físicas del hormigón.	≤ 2000 mg/l
Materia Orgánica	Modifican el fraguado y endurecimiento del hormigón, produciendo un retardo de fraguado. (Los azúcares producen efectos similares)	≤ 5 mg/l
Sólidos Disueltos	Si su cantidad es > 5000 mg/l, analizar cloruros y sulfatos.	≤ 15000 mg/l
Cloruros	Inducen o aceleran efectos corrosivos en las armaduras. Valores corresponden al total aportado por áridos, cemento, agua y aditivos.	< 1200 g Cl/m ³ (h.armado) < 250 g Cl/m ³ (h.pretensado)
Sulfatos	Producen compuestos expansivos. Valor corresponde al total aportado por los áridos, agua y aditivos.	< 600 g SO ⁻² ₄ / m ³

Fuente: Manual del Constructor. Empresas Polpaico, 2002.

En el hormigón armado son muy peligrosos los cloruros, pues anulan el efecto del cemento como protector de la oxidación y ponen en marcha el proceso de corrosión del acero dentro del hormigón, en presencia de humedad y oxígeno. Éstos pueden provenir del agua, de los áridos, de los aditivos (cloruro de calcio), y de ambientes salinos.

1.2.4. Aditivos y Adiciones⁽¹²⁾

1.2.4.1. Generalidades

Los aditivos son productos que, introducidos en pequeña proporción en el hormigón, modifican algunas de sus propiedades originales, se presentan en forma de polvo, líquido o pasta y la dosis varía según el producto y el efecto deseado entre un 0.1 % y 5 % del peso del cemento.

Las adiciones son materiales sólidos inertes que se agregan al hormigón.

El empleo de los aditivos y adiciones se ha ido generalizando hasta el punto de constituir actualmente un componente habitual del hormigón.

⁽¹²⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón.3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

Si bien los aditivos son un componente eventual del hormigón, existen ciertas condiciones o tipos de obras que los hacen indispensables.

El uso de aditivos estará condicionado por:

- Que se obtenga el resultado deseado sin tener que variar sustancialmente la dosificación básica.
- Que el producto no tenga efectos negativos en otras propiedades del hormigón.
- Que un análisis de costo justifique su empleo.

Su proporción de empleo debe establecerse de acuerdo a las especificaciones del fabricante, debiendo posteriormente verificarse según los resultados obtenidos en obra o, preferentemente, mediante mezclas de prueba.

1.2.4.2. Tipos de Aditivos y Adiciones

Los aditivos pueden modificar las propiedades reológicas del hormigón fresco, el fraguado y endurecimiento, la resistencia a las acciones físicas, y misceláneos.

1) Plastificantes reductores de agua ⁽¹³⁾

Se definen como aditivos que permiten, para una misma docilidad, una reducción de la cantidad de agua en un hormigón dado o que, para una misma cantidad de agua aumentan considerablemente esta docilidad o, incluso permiten obtener estos dos efectos simultáneamente.

El aumento de docilidad permite la colocación del hormigón en estructuras complicadas, con alta densidad de armadura o con efectos superficiales especiales sin necesidad de incrementar cantidad de agua de amasado y por consiguiente la dosis de cemento para obtener las resistencias especificadas. La disminución de la dosis de agua y en consecuencia de la razón agua / cemento, manteniendo una determinada trabajabilidad, permite aumentar la compacidad del hormigón y, por consiguiente, su resistencia, impermeabilidad y durabilidad. Por la misma razón, la retracción y en consecuencia, la tendencia a la fisuración se ven disminuidas.

La acción de los aditivos plastificantes puede ser causada por el efecto combinado de acciones de tipo físico, químico y físico-químico, dependiendo la preponderancia de alguna de ellas de su composición.

La acción física deriva principalmente de la incorporación de aire que producen algunos aditivos, cuyas burbujas, al actuar como especies de rodamientos entre las partículas sólidas, disminuyen la fricción interna.

La acción química proviene principalmente de una disminución de la velocidad de hidratación de los constituyentes del cemento, especialmente de los aluminatos. Se obtiene de este modo una

⁽¹³⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte. [fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/reologT9.htm> >.

acción mas completa (mejor mojado) de los granos de cemento, lo que permite también disminuir el roce interno entre las partículas.

Efectos: El principal efecto producido por los aditivos plastificadores (reductores de agua) incide sobre la trabajabilidad del hormigón en su estado fresco. Este efecto puede traducirse en una reducción de la dosis de agua, si se mantiene constante la docilidad o fluidez del hormigón, o en un aumento de su docilidad, si se mantiene constante la dosis de agua del hormigón.

2) Superplastificante o Fluidificante ⁽¹⁴⁾

Corresponden a una nueva generación de aditivos plastificadores sobre la base de productos melamínicos o naftalínicos, constituyendo una evolución de los aditivos reductores de agua, en que la absorción y la capacidad de dispersión del cemento es mucho más acentuada. Esto se traduce en un enorme aumento de la trabajabilidad del hormigón, sin modificar la cantidad de agua. El resultado es un hormigón muy fluido (autonivelante), de baja tendencia a la segregación.

Pueden utilizarse también como reductores de agua, siendo posible en este caso, dado su apreciable efecto, alcanzar disminuciones en la cantidad de agua entre 20% y 30%. Ello permite obtener un fuerte incremento en las resistencias, especialmente en las primeras edades, por lo que pueden utilizarse como aceleradores de endurecimiento o aditivos para hormigones de alta resistencia.

Efectos: Los superplastificadores se emplean en dosis mayores que los plastificadores reductores de agua, (0.8 a 3%) y pueden ser agregados al final del amasado sin diluir previamente en el agua. El efecto sobre la trabajabilidad del hormigón se mantiene entre 30 y 60 minutos según el aditivo, característica que hace conveniente agregarlo inmediatamente antes del término del amasado y obliga a una rápida colocación.

El efecto se termina una vez transcurrido el tiempo señalado, volviendo el hormigón a su docilidad inicial. Eventualmente puede agregarse una nueva dosis, remezclando el hormigón con el fin de prolongar el efecto por otro periodo.

Los hormigones fluidos obtenidos con estos aditivos pueden ser colocados con gran facilidad, pues son prácticamente autonivelantes y por lo tanto se reduce el trabajo de colocación y se elimina la necesidad de vibrar salvo en zonas densamente armadas.

Cuando los aditivos fluidificantes se emplean como reductores de agua se obtiene un incremento de algunas características del hormigón endurecido, especialmente su resistencia, durabilidad e impermeabilidad.

Por otra parte, debido a que no producen incorporación de aire, el efecto en las resistencias es superior al obtenido con los plastificantes-reductores de agua, especialmente en las primeras

⁽¹⁴⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte.[fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/reologT9.htm> >.

edades, lo que resulta muy conveniente para su empleo en hormigones pretensados, prefabricado y obras en que se requiere desarrollo rápido de resistencias.

Otro factor importante a tener en consideración, es sobre la base de ensayos de laboratorio y aplicaciones en obra indican que la sobredosis de aditivo superplastificantes o su aplicación en un hormigón de composición inadecuada puede producir una fuerte segregación, depositándose las partículas sólidas en una masa compacta y dura, mientras el agua de amasado sube a la superficie del hormigón.

3) Incorporadores de aire ⁽¹⁵⁾

Éste aditivo está destinado a producir la incorporación de aire en forma de pequeñas burbujas, en su mayoría de un tamaño comprendido entre 0.01 y 1 mm, con una distribución uniforme de las masas del hormigón. Éstas aparecen expuestas en la tabla 5.

La proporción de burbujas recomendable depende del tamaño máximo del árido más grueso del hormigón, empleándose por regla general los siguientes valores:

Tabla 5.- Proporción de burbujas recomendadas según tamaño máximo del árido.

Tamaño máximo	40 mm	20 mm	10 mm
% aire recomendado	4	5	7

Fuente: Compendio de Tecnología del Hormigón, 1992

El empleo de los incorporadores de aire está orientado básicamente a aumentar la resistencia del hormigón frente a los ciclos alternados de temperaturas bajo y sobre cero (hielo - deshielo), que puedan conducir al congelamiento del agua contenida en el hormigón.

Sin embargo, hacen también efecto sobre otras propiedades del hormigón, entre las cuales pueden citarse las siguientes:

- Reducción de la permeabilidad del agua y líquidos en general.
- Aumento de la consistencia del hormigón, en una forma similar al obtenido por la adición de granos finos.
- Aumento de la fluidez del hormigón.
- Disminución de la exudación del agua de amasado del hormigón.
- Disminución de la resistencia.

Este último efecto debe ser especialmente considerado, pues la disminución de la resistencia provocada por la incorporación de burbujas no alcanza a ser compensada por la disminución de la cantidad de agua de amasado posible de producir por efecto de la mayor fluidez.

⁽¹⁵⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte. [fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/reologT9.htm> >.

Efectos: La incorporación de aire en el hormigón produce diversos efectos sobre éste, tanto mientras se mantiene en estado plástico como cuando ya ha endurecido.

Debe señalarse que el efecto principal buscado con el uso de los incorporadores de aire es el aumento de la resistencia del hormigón frente a los ciclos alternados de hielo-deshielo, que pueden producirse en los períodos en que las temperaturas ambiente descienden bajo 0°C, caso en el cual su empleo debe considerarse imprescindible.

Sin embargo, la incorporación de aire tiene también otros efectos secundarios de importancia, algunos de características favorables para el uso del hormigón, los cuales se analizan en los párrafos que siguen:

- Efecto frente a los ciclos alternados de hielo - deshielo

Cuando existen bajas temperaturas ambiente que conducen a procesos de hielo y deshielo alternativos, las burbujas de aire incorporado en el hormigón actúan como cámaras de expansión frente al aumento de volumen que experimenta el agua al transformarse en hielo. Ello permite reducir las presiones hidráulicas y, con ello, las tensiones internas que se originan por este motivo, impidiendo así el deterioro progresivo que se producirá en un hormigón que no contenga aire incorporado.

- Efecto sobre la trabajabilidad del hormigón

Las burbujas de aire formadas en el hormigón fresco actúan al mismo tiempo como un fluido, aumentando su docilidad, y como un inerte, ya que, por su tamaño, equivalen a partículas de tamaño inferior a 2 mm, con la ventaja de tener un mejor coeficiente de forma, de ser elásticas y deformables, lo que les permite deslizarse sin rozamiento.

Se varían por lo tanto, las propiedades reológicas del hormigón, aumentando la cohesión con lo cual se reduce la tendencia a la segregación y la exudación, lo que facilita su puesta en obra.

Por otra parte, al disminuirse la exudación se evita la acumulación de agua bajo las barras de acero y los áridos gruesos, mejorando su adherencia, así como también disminuye la formación de lechada en las superficies.

Se debe considerar que la incorporación de aire produce disminuciones en las resistencias mecánicas del orden de 3 a 5% por cada 1% de aire incorporado. Esta pérdida de resistencia se compensa en parte al bajar la razón agua / cemento por el efecto plastificador antes mencionado.

- Efecto sobre la impermeabilidad

En el hormigón endurecido, las microburbujas producidas por el aditivo Incorporador de aire se interponen en la red de canaliculos interna que existe en todo hormigón, lo cual permite limitar la ascensión de agua por capilaridad. El hormigón resultante es, en consecuencia, más impermeable e, indirectamente, por ello más resistente a la acción de agentes agresivos.

4) Expansores – Estabilizadores ⁽¹⁶⁾

Estos aditivos forman burbujas de gas por reacción de algunos de sus compuestos entre sí o con los productos de la hidratación del cemento.

Esta reacción se produce en el interior del hormigón mientras este se mantiene fresco, de manera que, al quedar atrapadas las burbujas producidas, se genera una expansión del hormigón, motivo por el cual el empleo de este tipo de aditivos se puede orientar a producir dos efectos:

- Si el hormigón está libre para expandirse, el aumento de volumen generado permite compensar la disminución de volumen que normalmente experimenta el hormigón por efecto de la retracción hidráulica.
- Si el hormigón está confinado, el aumento de volumen puede generar un efecto de compresión, el cual puede compensar las tensiones de tracción que experimenta el hormigón por efecto de la retracción hidráulica.

Efectos: Como se ha indicado anteriormente, los aditivos expansores producen un aumento de volumen en el hormigón mientras este se mantiene aun en estado fresco. Posteriormente se produce una retracción hidráulica y como efecto secundario debe mencionarse que la formación de burbujas se traduce en la disminución de la resistencia.

5) Aceleradores de fraguado y endurecimiento ⁽¹⁷⁾

Son aditivos que adelantan el inicio de fraguado y aceleran el endurecimiento, permitiendo la obtención de resistencias más altas a edades tempranas, es decir, producen un aumento de la resistencia inicial del hormigón, principalmente en los primeros días.

Por estas características, los aceleradores son utilizados con los siguientes fines:

- Cuando se desea reducir el periodo de espera para la puesta en servicio de un elemento estructural.
- Para atenuar el efecto retardador producido sobre las resistencias iniciales del hormigón en los periodos de baja temperatura.

Efectos: El efecto producido por un acelerador depende de la dosis de cemento, por lo que no es posible dar valores medios sobre su efecto, el cual debe ser estudiado en cada caso en particular.

- Efecto sobre el tiempo de fraguado

Los aceleradores acortan los tiempos inicial y final de fraguado. Debido a este efecto es conveniente verificar que se producirán interferencias sobre los plazos de colocación del hormigón en las capas que constituyen cada etapa de ejecución de la obra.

⁽¹⁶⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte.[fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/reologT9.htm> >.

⁽¹⁷⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte.[fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/fragT9.htm> >.

- Efecto sobre las resistencias

El efecto de acelerar el desarrollo de resistencia a primeras edades del hormigón, puede ejercer influencia significativa sobre las resistencias a largo plazo, esto es en edades superiores a 28 días, pudiendo incluso reducirlas para altas dosis de aditivo.

- Efecto sobre la retracción

La retracción hidráulica posterior al fraguado de la pasta de cemento se ve aumentada por la adición de cloruros, con lo que también aumenta el riesgo de fisuración.

- Corrosión de las armaduras

La experiencia ha demostrado que la adición de cloruros puede favorecer la corrosión de las armaduras del hormigón armado manteniendo un ambiente húmedo. Debido a ello su empleo en el hormigón armado y pretensado está sujeto a las condiciones restrictivas establecidas en NCh 163 respecto del contenido total de cloruros, y debe ser necesariamente analizado cuando se contemple su uso.

6) Retardadores ⁽¹⁸⁾

La función principal de este aditivo es retardar el principio de fraguado de la pasta de cemento, manteniendo constante, en lo que sea posible, el tiempo de fraguado y las resistencias en las distintas edades.

El mecanismo de acción de los retardadores no es totalmente conocido. Sin embargo se supone que el aditivo es absorbido por los granos de cemento, produciéndose una capa relativamente impermeable, la cual posterga el proceso de hidratación normal, en particular del aluminato tricálcico.

Esta capa es finalmente penetrada por el agua, iniciándose el fraguado de acuerdo a su mecanismo habitual.

Efectos:

- Efecto sobre el tiempo de fraguado

Los retardadores ejercen su efecto postergando los tiempos de comienzo y término del fraguado de la pasta de cemento.

Esta condición puede resultar adecuada en los siguientes casos:

- ❖ En el hormigonado de elementos de gran dimensión en planta cuando la capacidad de transporte o de colocación de hormigón son limitadas.

⁽¹⁸⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte.[fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/fragT9.htm> >.

- ❖ Para atenuar el acortamiento de los tiempos inicial y final de fraguado en los periodos de alta temperatura ambiente.

- Efecto sobre el calor de hidratación

En general, las experiencias demuestran que el calor desprendido en las primeras 24 horas es tanto mas bajo cuanto mayor haya sido el retardo producido. Sin embargo, el calor total desarrollado es igual después de algunos días y a los 7 días puede ser incluso superior el del mortero con el retardador que sin él.

- Efecto sobre las resistencias mecánicas

En general, las experiencias indican que las resistencias mecánicas son inferiores hasta los 3 días, pero después de esta edad tienden a igualarse para superarse a los 28 y 90 días, efecto que es tanto más notorio cuanto mayor sea el retardo.

- Efecto sobre la retracción

Tal como se manifiesta con las otras características del hormigón, algunas experiencias efectuadas indican que aparentemente el empleo de un aditivo retardador disminuye la retracción inicial, pero el valor final de esta puede aumentar por sobre el del hormigón sin aditivo. Sin embargo debe señalarse que este punto no ha sido lo suficientemente investigado para establecer su plena validez.

- Efecto sobre la trabajabilidad

En general los retardadores tienen un efecto plastificante sobre el hormigón fresco, mejorando la docilidad o permitiendo una reducción del agua de amasado.

7) Hidrófugos de masa (impermeabilizantes) ⁽¹⁹⁾

Éstos aditivos están destinados a reducir la penetración o paso de agua a través del mortero u hormigón. Se denomina hidrófugo de masa aquel que se incorpora en el mortero u hormigón en el momento del amasado. Se excluyen, por lo tanto, los productos aplicados superficialmente, los que se denominan impermeabilizantes superficiales.

El agua puede incorporarse en la masa de una estructura por dos procesos diferentes: presión hidrostática o capilaridad. En el primero, el agua tiende a atravesar la masa del hormigón, escurriendo a través de las discontinuidades que este posee en su interior en forma de fisuras y poros intercomunicados. En la capilaridad el desplazamiento del agua se produce debido a la existencia de microfisuras de tamaño capilar, que permiten la ascensión del agua por efecto de su tensión superficial. Por este motivo, la altura alcanzada por el agua que asciende a través de los capilares es mayor cuanto más finos son.

⁽¹⁹⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte.[fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/accioT9.htm> >.

Por las características señaladas, para aumentar la impermeabilidad del hormigón es necesario obturar las fisuras, microfisuras y poros que posee normalmente y que derivan de la generación de tensiones internas de tracción durante el proceso de hidratación y endurecimiento y de la evaporación de parte del agua de amasado, incorporada para lograr una adecuada trabajabilidad mientras está aun en estado fresco.

Esta obturación se logra con la incorporación de granos muy finos, aportados por el cemento y la arena que intervienen en su composición. Sin embargo, dado que estos granos finos solo pueden ser incorporados en cantidad limitada porque se afectan otras propiedades del hormigón o por razones de costo, un buen procedimiento para lograr esta impermeabilidad lo constituyen los hidrófugos de masa.

En general, los hidrófugos se recomiendan para hormigones con dosis moderadas de cemento, puesto que en ellos pueden desarrollar su efecto obturador de los poros, microfisuras y fisuras capilares que poseen.

En hormigones con dosis alta de cemento el efecto de obturación lo produce este último componente, por lo que para obtener un mayor efecto es conveniente el uso de aditivos plastificantes – reductores de agua y/o incorporadores de aire, los que contribuyen a aumentar la compacidad del hormigón y, en consecuencia, su impermeabilidad.

Debe tenerse presente que no es posible lograr impermeabilidad sobre la base de hidrófugos en hormigones defectuosos con un gran volumen de huecos, poros o nidos de piedra.

Los hidrófugos se comercializan en forma de polvo o líquido mas o menos pastoso y se utilizan en dosis que varían de un 0.5% al 5% del peso del cemento.

Finalmente, debe considerarse también que indirectamente los plastificantes - reductores de agua también tienen características impermeabilizantes, pues, al disminuir la dosis de agua manteniendo la docilidad del hormigón, producen un aumento en la compacidad.

Por su parte, los incorporadores de aire también contribuyen a la impermeabilidad frente a la capilaridad al interponer burbujas de aire, que disminuyen el efecto de la tensión superficial del agua, en las vías de filtración que constituyen las fisuras y microfisuras.

Efectos: El efecto principal de los hidrófugos se relaciona con la disminución de la permeabilidad de los hormigones y morteros.

Las experiencias obtenida con el uso de hidrófugos indican que éstos, además de reducir la permeabilidad del hormigón, pueden tener efectos sobre las siguientes propiedades:

- Pueden producir un retardo del fraguado de la pasta de cemento, especialmente si contiene lignosulfatos con azúcares.
- Aumentan la docilidad del hormigón

- Disminuye la exudación
- Pueden disminuir las resistencias mecánicas, especialmente si el hidrófugo incorpora aire.
- Pueden producir un aumento de la retracción hidráulica.

Por este motivo, antes de emplear un hidrófugo de masa es conveniente solicitar informaciones sobre los efectos secundarios que pueden derivar de su empleo.

Los hidrófugos actúan físicamente, obturando los poros, microfisuras y fisuras existentes en el hormigón por intermedio de dos procesos de distinta índole.

- Por presencia de partículas extra – finas con elevada superficie específica y que contribuyen a aumentar la compacidad de la mezcla.
- Por llenado de las discontinuidades internas con una capa superficial impermeable o formando geles que obstruyen los intersticios al aumentar de volumen por acción del agua.

8) Anticongelantes⁽²⁰⁾

Los anticongelantes son productos solubles, análogos a los acelerantes, que activan la hidratación del cemento. Ello permite obtener desprendimiento más rápido del calor de hidratación del cemento, aumentando así en algunos grados la temperatura del hormigón durante el amasado.

Por otra parte, éstos aditivos rebajan la temperatura de congelación del agua del hormigón.

Estos efectos combinados permiten que el hormigón se endurezca antes que se produzca su congelamiento por efectos de las bajas temperaturas durante el hormigonado en tiempo frío.

El empleo de este tipo de aditivos, unido al uso de las medidas de protección recomendadas en la tecnología para el hormigonado a bajas temperaturas, permite el trabajo hasta con temperaturas de -10°C .

Dado que el efecto de este tipo de aditivos depende de la concentración que se use en proporción al agua de amasado del hormigón y de la clase de cemento empleado, es conveniente verificar en la práctica su aplicabilidad o, al menos, obtener información sobre otras experiencias de uso en condiciones similares al de la obra en construcción.

⁽²⁰⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte.[fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/accioT9.htm> >.

9) Aditivos combinados⁽²¹⁾

Estos productos combinan los efectos de dos o más de los aditivos antes descritos, destacándose entre ellos: Plastificantes–retardadores, plastificantes–aceleradores, plastificantes–incorporadores de aire, etc.

Para ellos son válidos los mismos conceptos que se han dado sobre cada uno independientemente. Presentan la ventaja de actuar simultáneamente sobre distintas propiedades del hormigón, sin tener que recurrir al empleo de dos aditivos en forma conjunta, lo que puede inducir a errores de aplicación, especialmente cuando su dosis es muy diferente.

Sin embargo, como consecuencia de los efectos secundarios que se derivan de los aditivos componentes, deben ser formulados para que su efecto sea mas bien moderado. Ello puede constituir una limitación para algunos casos particulares en que sea necesario un efecto mayor de uno de los aditivos componentes, no siendo posible actuar independientemente sobre él.

Por ejemplo, un plastificante retardador tiene un efecto limitado sobre el retardo y en los casos en que se necesita un retardo mayor que el que puede producir un aditivo combinado, será necesario emplear un plastificante y un retardador separadamente.

10) Colorantes⁽²²⁾

El color de los morteros y hormigones, depende del color de los áridos y del cemento, siendo este último el que le confiere el color gris que le es característico, siendo la tonalidad mas o menos oscura según sea su composición, principalmente en lo que concierne al contenido de adiciones, presencia de óxidos metálicos, especialmente óxidos de hierro, etc.

En comparación con los cementos Pórtland, el contenido de escoria de alto horno (cementos siderúrgicos) le confiere una tonalidad tanto mas clara cuanto mayor es el contenido de escoria. Por el contrario, los hormigones fabricados con cementos puzolánicos resultan con una tonalidad algo más oscura. Una coloración más clara puede obtenerse empleando cementos blancos, los que se obtienen mediante una fabricación especial en la que se cuida particularmente la composición y el contenido de óxidos.

En las obras de hormigón a la vista, en la prefabricación o en algunos tipos de recubrimientos sobre la base de cemento, la coloración es un aspecto significativo lo que lleva a elegir el cemento y los áridos según la tonalidad deseada. En estos casos resulta adecuado preocuparse también de la confección de las mezclas y cuidar los procedimientos de vaciado, colocación y compactación del hormigón para obtener un tono uniforme, sin manchas y defectos locales como segregaciones, porosidades, nidos de piedra, chorreaduras de lechada, etc. En algunos casos

⁽²¹⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte.[fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/miscelaneoT9.htm> >.

⁽²²⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte.[fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/miscelaneoT9.htm> >.

especiales, las preocupaciones anteriores deben complementarse, si por razones arquitectónicas o de otra índole se requiere incorporar un color diferente del normal a la masa de morteros y hormigones, caso en el cual es necesario recurrir al empleo de aditivos colorantes.

Los colorantes o pigmentos son polvos finos constituidos generalmente por óxidos metálicos.

Algunos requisitos que deben cumplir los pigmentos para ser utilizados en mezclas de cemento, son las siguientes:

- Poder colorante y regularidad de tono. En general se requiere que el producto confiera el color deseado aplicado en dosis de 1 a 3% del peso del cemento y no mayor que 5%, ya que en este caso podría afectar las resistencias mecánicas al producir un mayor requerimiento de agua.
- Mojabilidad y fácil dispersión. Los colorantes que se mojan con dificultad o tienden a flotar hacen difícil su incorporación uniforme a las mezclas.
- Estabilidad a los agentes atmosféricos y a la luz, como también frente a la cal y los álcalis del cemento.
- Limitado contenido de sales para evitar eflorescencias
- Neutralidad química con el cemento.

Su incorporación no debe afectar al fraguado y endurecimiento ni provocar hinchamientos en el hormigón.

Recomendaciones para el empleo de pigmentos

El pigmento colorante debe agregarse como un material adicional durante la fabricación del mortero u hormigón que se desea colorear. Para lograr una buena homogeneidad es recomendable dispersar primero el pigmento en el cemento, mezclándolo luego con los áridos para finalmente incorporar el agua. Para la elección de un pigmento, debe considerarse que algunos pigmentos se decoloran por efecto de la luz, de la temperatura, o por reacción con algún compuesto del cemento.

Por las razones expuestas, previamente a su empleo en obras de hormigón visto, es conveniente reunir antecedentes respecto de su empleo en otras aplicaciones anteriores, verificar su aplicabilidad en las mismas condiciones de obra y, si es necesario, confeccionar muros de prueba con el fin de someterlos a la aprobación de los responsables de las especificaciones técnicas de arquitectura.

11) Agentes formadores de espuma ⁽²³⁾

Se utilizan para confeccionar hormigones celulares, incluyendo burbujas de diámetro entre 0.5 y 4 mm que reemplazan a los áridos con el fin de obtener una mezcla de baja densidad. Con este procedimiento la densidad puede variar de 0.4 a 1.0 kg/dm³ según sea la cantidad de espuma incorporada. Los agentes espumantes deben producir burbujas estables y resistentes a la presión que por sobre ellos ejercen los componentes del hormigón durante el periodo en que este permanece en estado fresco. Los espumantes, al ser agitados en agua, producen espuma, la cual al ser dispersada durante el amasado en la masa del hormigón, incorpora las burbujas de aire para disminuir la densidad. Para lograr este objetivo, los morteros u hormigones celulares se confeccionan agregando primero la espuma, preparada agitando el aditivo espumante en agua, a una lechada de cemento o a un mortero fino, a los cuales posteriormente se les agrega el resto de los componentes del hormigón.

Efectos: La incorporación de las burbujas de aire tiene como consecuencia que las resistencias mecánicas disminuyan considerablemente, en función de la dosis de aditivo y, consecuentemente, de la densidad aparente resultante.

12) Microsílice ⁽²⁴⁾

La microsíllice es una adición que está constituida por un polvo de gran finura y con un alto contenido de sílice, obtenido como subproducto en algunos procesos industriales.

Su finura alcanza valores del orden de 20 a 25 veces más alta que la del cemento y su contenido de sílice se sitúa en valores comprendidos entre 90 y 100%.

Debido a estas características tiene una elevada actividad puzolánica, propiedad que resulta importante para la obtención de hormigones de alta resistencia, especialmente a edades inferiores a 28 días.

Su dosis debe ser la recomendada por los fabricantes, y se debe ajustar la dosis óptima en cada caso específico.

Efectos: En el hormigón aumenta significativamente su consistencia a causa de su elevada finura, por este motivo se debe tener cuidado a las dosis elevadas de este producto, especialmente si son superiores al 10% del peso del cemento, ya que podrían producirse dificultades para la manejabilidad del hormigón en obra.

- Incrementa las resistencias mecánicas y a la abrasión
- Reduce la permeabilidad

⁽²³⁾ DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte. [fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en: < <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/miscelaneoT9.htm> >.

⁽²⁴⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

- Aumenta la resistencia a los ataques químicos
- Incrementa la cohesión
- Reduce la exudación
- Su extrema finura incrementa la demanda de agua para obtener trabajabilidad, por lo tanto se debe usar con aditivo plastificante o superplastificante.

Por último esta adición tiene un elevado costo por lo cual su uso debe ser considerado cuidadosamente, realizando experiencias previas a la decisión de su empleo.

1.3. HORMIGÓN PREMEZCLADO

1.3.1. Generalidades

El hormigón premezclado es aquel cuya producción se realiza en forma industrial y que generalmente es encargada a un tercero como servicio.

En la Norma Chilena NCh 1934. Of1992 “*Hormigón preparado en central hormigonera*”, se regula los principales aspectos entre el productor y el consumidor.

La industria del hormigón premezclado ha ido evolucionando, ya no sólo se dedica a la producción de hormigón, sino que además entrega un servicio global que está asociado al producto.

Las características de un hormigón premezclado son: costo competitivo con auto-producción y calidad de producción.

La calidad en la producción de un hormigón homogéneo se debe a:

- Dosificación en peso.
- Estricto control de materiales y del proceso de fabricación.
- En muchos casos el vaciado se puede efectuar en el lugar de colocación o de sus proximidades.
- Personal altamente especializado.

1.3.2. Factores a considerar para su uso

Para el uso de hormigón premezclado debe haber coordinación entre consumidor y productor, de esta manera se obtendrá un servicio óptimo y eficiente.

- ❖ Se debe definir clara y completamente las características del hormigón requerido al momento de la solicitud.
- ❖ Se debe entregar claramente la ubicación de la obra, fecha y programación en el tiempo de la llegada de los camiones a la obra.

- ❖ En obra se debe tener un buzón o cancha de recepción.
- ❖ Se debe tener personal y equipo suficiente para su colocación en un mínimo de tiempo.
- ❖ Se debe disponer de accesos expeditos dentro de la obra.

La unidad de compra es el volumen de la amasada en m³ de hormigón fresco compactado. La medición de este volumen se determina dividiendo la masa total del hormigón transportado por la densidad aparente del hormigón fresco, determinado según NCh 1564. Of79 “*Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco*”.

Para los efectos del cumplimiento de la unidad de compra, se establece una tolerancia de $\pm 3 \%$ del volumen nominal de la amasada de entrega.

1.3.3. Elementos utilizados en la fabricación de hormigón premezclado

Los elementos que se utilizan en la fabricación de éstos hormigones, son casi los mismos que se usan en la confección en general del hormigón. La principal diferencia es la utilización de tecnología, como se aprecia en el cuadro 3.

Cuadro 3.- Elementos utilizados en la fabricación de hormigón premezclado.

Materiales	Cemento	Al menos dos grados: Corriente y alta resistencia Suministro permanente. Gran capacidad de stock.
	Áridos	Normalmente cuatro tipos: grava, gravilla, arena gruesa, arena fina Proveedores permanentes. Características muy conocidas.
	Aditivos	Normalmente plastificante y en ocasiones retardador Posibilidad de empleo de cualquier tipo de aditivo.
Equipos	Medición	En peso. Equipos computarizados, con compensación de humedad Registro de mediciones efectuadas.
	Amasado	Generalmente en los camiones mixer Mantenimiento mecánico sistemático.
Equipos de transporte	Camión Mixer	Capacidad de transporte entre 3 y 7 m ³
	Camión Tolva	Se puede emplear sólo a solicitud y bajo la responsabilidad del comprador (distancias cortas, asentamiento de cono ≤ 4 cm).

Ref. : Manual del Constructor, Empresas Polpaico, 1988.

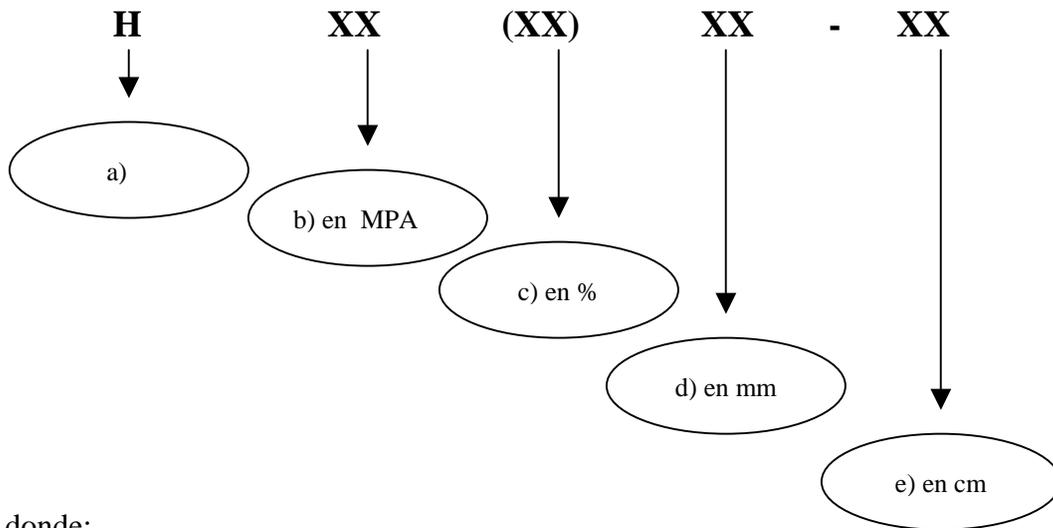
1.3.4. Especificación del Hormigón

En la utilización de hormigones premezclados se debe definir clara y completamente las características de éste.

Se podría decir que existen dos tipos de informaciones para especificar el hormigón:

- ❖ Información mínima requerida, recogida en la figura 1.

Figura 1.- Especificación en el nombre del hormigón según requerimientos.



En donde:

- a) Se refiere al hormigón. Clasificación de acuerdo al uso.

Algunas de las siglas utilizadas son:

H: Hormigones que se clasifican de acuerdo a su resistencia a la compresión, según la NCh 170. Of85 “*Hormigón – Requisitos generales*”.

HF: Hormigones que se clasifican de acuerdo a su resistencia a flexo-tracción, según la NCh 170. Of 85 “*Hormigón – Requisitos generales*”.

G: Hormigones que se clasifican de acuerdo a su resistencia determinada en probeta cilíndrica normal, según la ACI 318-99.

P: Hormigones de pavimentos, donde se especifica su resistencia a flexo-tracción, según la NCh 170. Of85 “*Hormigón – Requisitos generales*”. (en algunas empresas de hormigón premezclado se utiliza **HP**)

S: Hormigones que se clasifican de acuerdo a la cantidad de cemento por m³ de hormigón compactado.

- b) Resistencia especificada según NCh 170. Of85, se expresa en Mpa a la edad de 28 días.

- c) Nivel de confianza. Se define como la fracción expresada en porcentaje o en fracción decimal, de resultados iguales o superiores a un valor especificado, según la NCh 170. Of85, el nivel de confianza se expresa en porcentajes y encerrado en paréntesis. Los valores más comunes son 80, 85, 90, y 95, siendo generalmente especificados por el proyectista.

Algunas empresas la usan como la Fracción Defectuosa según NCh 1998. Of1989 “*Hormigón – Evaluación estadística de la resistencia mecánica*”.

- d) Tamaño máximo nominal del árido. Corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor que el tamaño máximo absoluto (D_a), cuando por dicho tamiz pasa el 90% o más de la masa de un árido, según la NCh 163. Of79 “*Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales*”. El tamaño máximo absoluto corresponde a la abertura del menor tamiz de las series establecidas en la NCh 165. Of77 “*Áridos – Tamizado y determinación de la granulometría*”, que deja pasar el 100% de la masa del árido, según la NCh 163. Of79. Expresado en milímetros, el tamaño nominal del árido suele ser 40 cuando se solicita hormigones con grava, 20 cuando se trata de hormigones con gravilla, o 13 y 10 cuando se trata de arena.
- e) Docilidad. Se define como la facilidad del hormigón fresco para ser transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación, de acuerdo a la NCh 1019 Of74 “*Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del Cono de Abrams*”. La docilidad se determina de acuerdo al método del asentamiento de cono de Abrams, en laboratorio y en obra. Estos valores dependerán de las especificaciones, condiciones y recomendaciones particulares para cada obra, dadas por la NCh 170 Of85 y/o proyectista.

❖ Información adicional, si se fijan otras características al hormigón.

- . Tipo de cemento (grado corriente o alta resistencia)
- . Dosis mínima o máxima de cemento
- . Aditivos especiales (impermeabilizante, incorporador de aire y otros)
- . Tiempo de transporte y descarga del hormigón (sí es mayor a 2 horas)
- . Ensayos especiales (impermeabilidad, hendidamiento y otros)
- . Edad de ensayo (sí es distinto a 28 días)
- . Tipo de probetas (sí son distintas a probetas cúbicas)

CAPITULO II RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL HORMIGÓN

En este capítulo al igual que el anterior, se utilizará como referencia principal el “Manual del Hormigón” del Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, debido a que es la única fuente válida basada en las Normas Chilenas, para desarrollar materias relacionadas al Hormigón.

2.1. GENERALIDADES

Las propiedades del hormigón evolucionan con el tiempo. Desde el momento en que se adiciona agua al cemento, comienza un proceso físico-químico complejo de larga duración, a través del cual el hormigón experimentará un proceso de endurecimiento progresivo que lo transformará de un material plástico en uno sólido. Este proceso permitirá al hormigón adquirir su capacidad para soportar esfuerzos que se manifiestan por solicitaciones a compresión, a tracción, a flexión, flexo-tracción y al corte. La capacidad del hormigón de resistir estos tipos de solicitaciones, define su aptitud para ser utilizado en distintas aplicaciones estructurales.⁽¹⁾

Otras características del hormigón como su impermeabilidad y densidad, tienen relación directa con la resistencia mecánica.

En general, y en el hormigón en particular, medir la capacidad o resistencia a la compresión es relativamente sencillo comparado con las mediciones de tracción o flexión. Por esta razón, se utiliza la resistencia a compresión del hormigón como medida de su calidad general, en el sentido que, a mayor resistencia mayor densidad, mayor impermeabilidad y mayor durabilidad en general.

Debido a lo anterior, la resistencia mecánica a la compresión del hormigón es el factor que frecuentemente se usa para definir su calidad y en efecto constituye una de sus características principales. Aunque debe quedar claro que el “número” que resulta del ensayo no es, por supuesto, una medida de la resistencia intrínseca del concreto en la estructura, sino sólo de su calidad. Por lo tanto la resistencia es una forma sencilla de identificar si se cumplen las especificaciones del hormigón.⁽²⁾

En un proyecto los cálculos se realizan sobre la base de la resistencia especificada del hormigón, en consecuencia, es muy importante mantener un control de ella, ya que permite comprobar que la resistencia del hormigón con el que se trabajó en obra es por lo menos igual a la resistencia especificada.

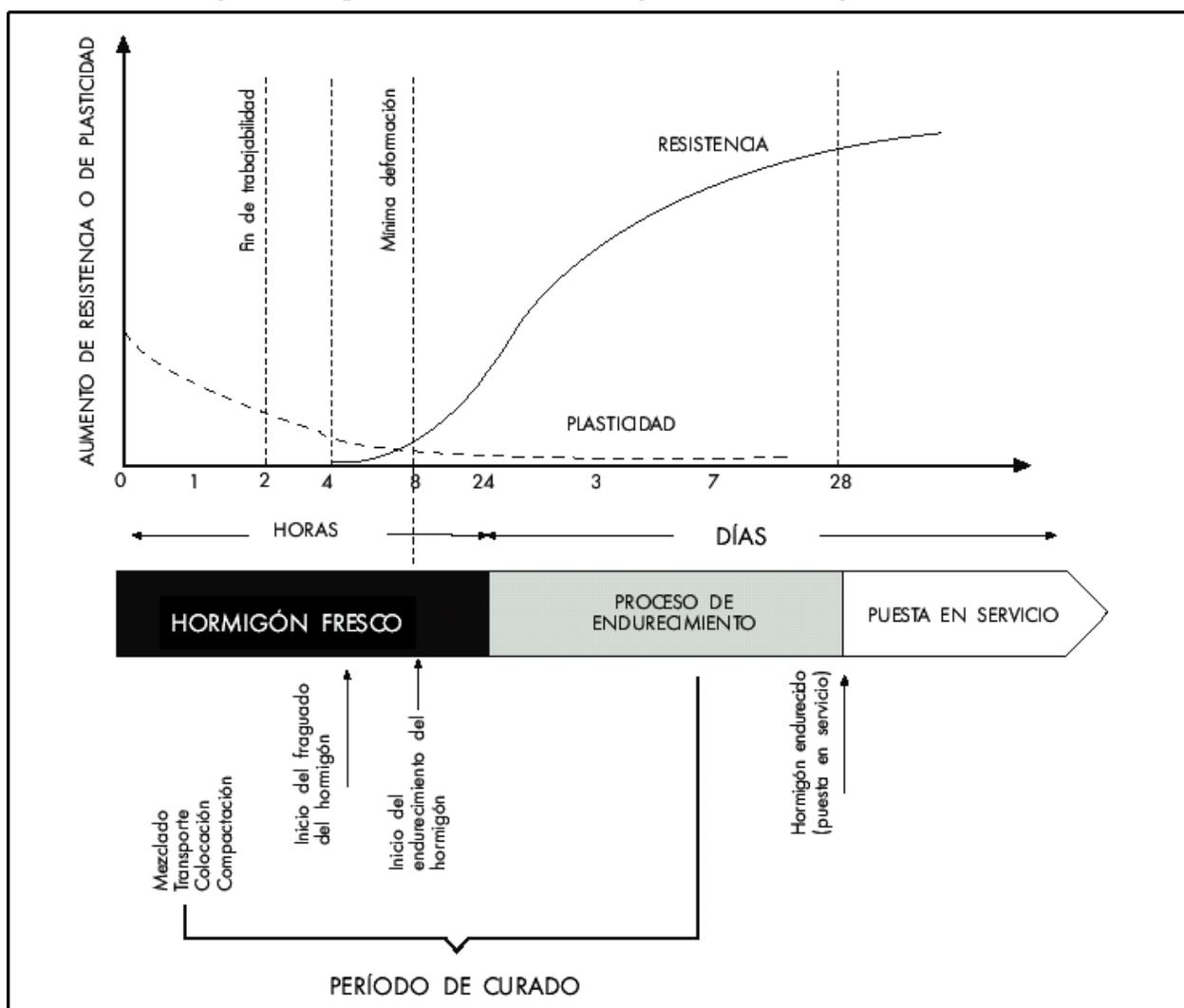
⁽¹⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

⁽²⁾ NEVILLE, Adam y BROOKS, J. Tecnología del Concreto. México, Trillas, 1998. 329 p.

En el desarrollo de la resistencia del hormigón se supone y acepta que el hormigón adquiere la resistencia de trabajo al cabo de 28 días, aunque ésta sigue desarrollándose en forma prácticamente indefinida a lo largo del tiempo.

En la siguiente figura se muestra el aumento gradual de la resistencia que tiene el hormigón a medida que transcurre el tiempo. También se pueden observar las etapas de transición que tiene el hormigón desde su estado fresco hasta la puesta en servicio de la obra.

Figura 2.- Etapas de transición del hormigón fresco a hormigón endurecido.



Ref. : Manual del Constructor, Empresas Polpaico, 2002.

Para controlar si el hormigón cumple o no con las exigencias establecidas, es obligatorio el ensaye de muestras de éste material a los 28 días de edad. Para ello, la resistencia a la compresión se obtiene aplicando una fuerza directa de compresión axial sobre una muestra de hormigón endurecido, hasta el momento de rotura de la misma.

2.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

2.2.1. Influencia de los Materiales

En el capítulo anterior se habló extensamente sobre cada uno de los materiales con el que se fabrica el hormigón y de como estos influyen en su comportamiento. Por esta razón a continuación sólo se nombrará de manera resumida de que manera afectan éstos en la resistencia del hormigón.

- ❖ Tipo de cemento: la calidad del cemento mejora la resistencia del hormigón a edades tempranas; a igual dosis un cemento de alta resistencia produce a 28 días un aumento del 20 – 30% en el valor de la resistencia con relación al cemento corriente, pero es poco significativo para edades mayores a 6 meses.
- ❖ Calidad del agua: si el agua contiene impurezas indeseables, superiores a los límites admisibles, puede influir seriamente en el fraguado y en el desarrollo de la resistencia del hormigón.
- ❖ Calidad de los áridos: Si se cumplen con los requisitos básicos en la calidad de los áridos, la resistencia de éstos no influye en la resistencia del hormigón. Sin embargo, la graduación y formas de los áridos determinan la cantidad de agua y cemento, influenciando fuertemente la resistencia para mantener una consistencia dada.
- ❖ Aditivos: como se explicó en el capítulo anterior el uso de aditivos podría alterar la resistencia final del hormigón. (según sea el caso)

2.2.2. Influencia de la Dosificación

El objetivo de la dosificación de hormigones es encontrar y determinar la combinación más económica y práctica de los componentes del hormigón, que cumpla con los objetivos requeridos en obra.

La resistencia aumenta con la cantidad de cemento. Sin embargo, cuando la dosificación de cemento sobrepasa los 400 Kg/m³, se incrementa fuertemente la retracción y el calor de fraguado y deben prevenirse sus efectos. Existen casos en donde pueden emplearse dosis mayores pero deben adoptarse sistemas de protección y curado que sean eficientes y oportunos.

Si una mezcla contiene menos dosis de cemento que la recomendada, puede que la resistencia y trabajabilidad no se vean afectadas (dependen de la dosis de agua), pero sí la durabilidad del hormigón.

La resistencia del hormigón disminuye al aumentar la cantidad de agua de amasado más allá de la requerida. Para mantener la resistencia será necesario adicionar cemento lo que elevará los costos del hormigón. Por cada litro de agua en exceso se debe agregar aproximadamente 2 Kg de cemento para mantener la resistencia, si esto no se hace la resistencia será menor.⁽³⁾

⁽³⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

Los áridos se deben dosificar en proporciones que den la máxima compacidad, es decir, un volumen de huecos mínimos.

La resistencia a compresión del hormigón aumenta al disminuir la relación agua / cemento.

Normalmente las dosificaciones se deben verificar en laboratorio o en obra antes de ser aplicadas. En la norma NCh170. Of85 “*Hormigón – Requisitos generales*”, se especifica una dosis mínima para garantizar la impermeabilidad y durabilidad (dependiendo del tipo de obra), independientemente que con dosis menores se alcance la resistencia especificada. Esto debe tenerse en cuenta en el momento de especificar el hormigón que se requiere en un determinado proyecto.

2.2.3. Influencia de la razón agua / cemento. Ley de Abrams

Una de las causas más comunes de la baja calidad de los hormigones es el uso de demasiada agua. Del total de agua que interviene en la confección del hormigón una parte es absorbida al interior de los áridos, el resto se denomina *agua libre o agua neta*. Sólo una parte del agua libre reacciona con el cemento, aproximadamente el 25% del peso de éste; el excedente se utiliza para proporcionar docilidad a la mezcla y lograr una masa plástica. En definitiva el agua libre de amasado estará formada por el agua de hidratación más el agua adicional. Esta última no participa en la reacción y posteriormente se evaporará dejando en su lugar *poros de aire*.⁽⁴⁾

A medida que aumenta el agua libre, mayor es la cantidad de agua que no se combina. Al evaporarse el exceso de agua, la pasta resultará más porosa y como consecuencia, su resistencia decrecerá.

Este hecho fue demostrado por Abrams, señalando que “ *para un hormigón perfectamente compactado, empleando buenos áridos y un cemento dado, la resistencia depende solamente de la razón agua / cemento*”.

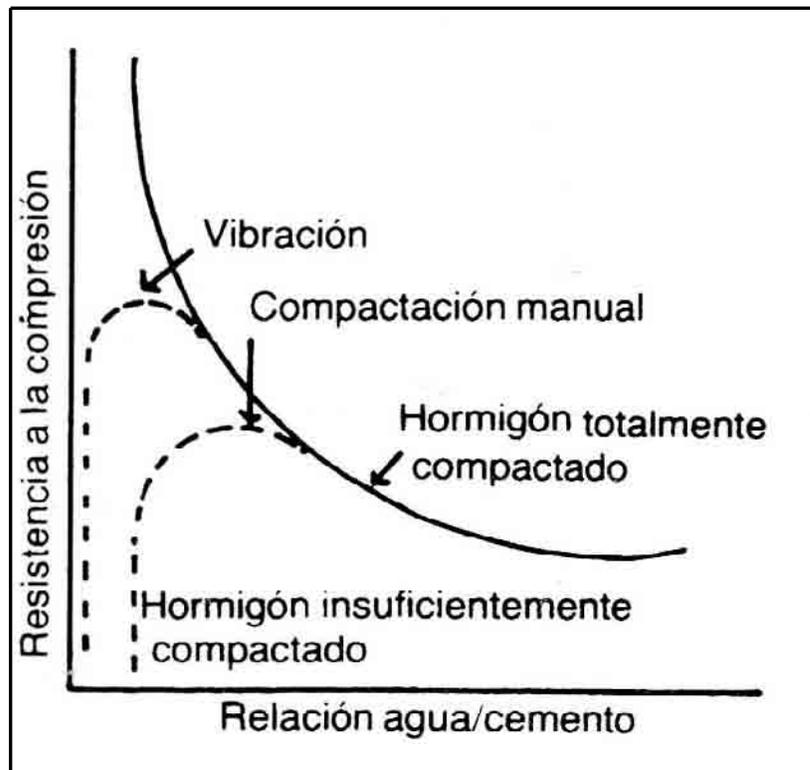
La razón agua / cemento es el cociente entre el peso del agua libre y el peso del cemento empleado.

$$\text{Razón w/c} = \frac{\text{peso de agua libre}}{\text{peso de cemento}}$$

En general, cuanto menor sea la razón w/c, mayor será la resistencia; sin embargo al emplear razones w/c muy bajas, la mezcla se hará más seca y difícil de compactar, quedando porosas, al punto que la resistencia empezará a decrecer, como se puede apreciar en la figura 3.

⁽⁴⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

Figura 3.- Correspondencia entre la resistencia y la relación agua / cemento del hormigón.



Ref.: Manual del Hormigón. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón de Chile, 1988.

Cuando se cuenta con vibración se podrá emplear razones de w/c menores que con apisonado manual.

Como se ha visto la razón agua / cemento es un factor determinante en las propiedades del hormigón fresco y del hormigón endurecido.

A menor razón agua / cemento, se tendrán mejores cualidades en el hormigón endurecido tales como:

- ❖ Aumento de resistencias mecánicas
- ❖ Aumento de impermeabilidad
- ❖ Mejor adherencia entre el hormigón y el refuerzo
- ❖ Mejor retracción hidráulica
- ❖ Mejor durabilidad (resistencia o condiciones climáticas)

2.2.4. Influencia de la Edad en la Resistencia del Hormigón

El hormigón va adquiriendo mayor resistencia a medida que transcurre el tiempo, contando desde el momento de su confección en adelante. Esto se debe a que las reacciones de hidratación del cemento que dan origen a los compuestos resistentes, son procesos relativamente lentos y que bajo condiciones favorables de humedad y temperatura pueden seguir desarrollándose en forma prácticamente indefinida a lo largo del tiempo.

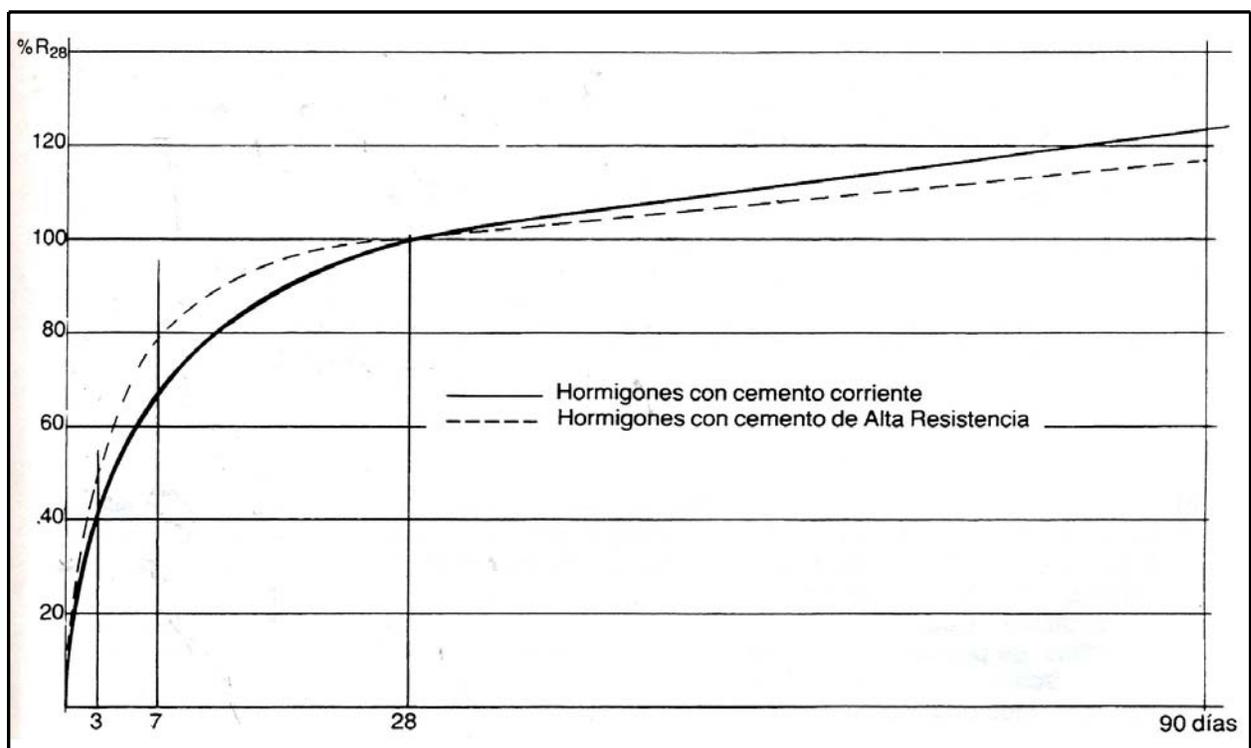
Al procedimiento que se utiliza para proteger la hidratación del cemento, se le llama *curado*. Este consiste en mantener controlada la temperatura y la humedad tanto hacia adentro como hacia

fuera del hormigón, por lo tanto, su objetivo es mantener el hormigón saturado, o lo más cercano posible a la saturación, hasta el momento en que los espacios de cemento fresco que originalmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de hidratación del cemento.

El aumento de temperatura durante el curado acelera las reacciones químicas de la hidratación, es decir, aceleran el endurecimiento, de esta manera afecta positivamente la resistencia temprana del concreto sin dañar la resistencia posterior. Sin embargo, una temperatura muy alta durante el curado y el fraguado puede ejercer efectos adversos sobre la resistencia a partir de los 7 días. Es importante mantener la temperatura dentro de los márgenes normales, entre los 16 °C y los 40°C, curar a temperaturas menores que 5 °C no es suficiente, ya que las temperaturas bajas que actúan sobre el hormigón recién colocado, hacen que el fraguado disminuya su rapidez.

La mayor o menor rapidez con que se desarrolla la resistencia de un hormigón depende de la velocidad de hidratación del cemento empleado en su confección, la que varía de acuerdo con la clase de cemento y con su finura. Los cementos Portland son más rápidos que los cementos con adiciones y también lo son los cementos de grano más fino con respecto a los de menor finura.⁽⁵⁾, que se refleja en el gráfico 1.

Gráfico 1.- Desarrollo de la resistencia en el tiempo, expresada como porcentaje de la resistencia a los 28 días



Fuente: Manual del hormigón. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón de Chile

En la figura anterior se muestran las curvas de desarrollo de resistencia de dos hormigones, una con cemento corriente y otra con cemento de alta resistencia, los cuales han sido dosificados para obtener la misma resistencia media a 28 días. Para cumplir con esta condición, el hormigón de

⁽⁵⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., 1988. 100 p.

cemento corriente necesita una dosis de cemento más alta que el hormigón de cemento de alta resistencia. Por lo tanto, si ambos hormigones se confeccionasen con igual dosificación y dosis de cemento, aquél con alta resistencia tendría a 28 días una resistencia mayor que el de cemento corriente, aunque en el largo plazo ambas resistencias tenderían a ser similares.

2.3. ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL HORMIGÓN

2.3.1. Extracción de muestras del hormigón fresco

La norma NCh 171. EOf.75 “*Hormigón- Extracción de muestra del hormigón*”, establece los procedimientos para extraer muestras representativas del hormigón fresco que se destinan a ensayos, ya sea en laboratorio o en obra.

El tamaño de la muestra será superior a una y media vez el volumen necesario para efectuar los ensayos requeridos y en ningún caso inferior a 30 litros.

2.3.1.1. Extracción de muestras de fabricación

- 👉 Desde hormigoneras: se efectúa la extracción en uno o más intervalos regulares durante la descarga sin incluir el primer y último 10%, sin restringir el flujo de salida del hormigón.
- 👉 Desde camiones hormigoneros: Se regula en primer lugar el flujo de descarga del hormigón mediante la velocidad de rotación del tambor, sin estrangular el flujo de la compuerta. Se efectúa la extracción de la muestra en tres o más intervalos regulares durante la descarga, sin incluir el primer y último 10%

En ambos casos, se extraerá la muestra pasando el recipiente de muestreo por toda la sección del flujo de descarga, o bien desviando completamente el flujo hacia un recipiente.

2.3.1.2. Extracción de muestras en sitio

- 👉 Desde un acopio: Se extraen por lo menos cinco porciones de muestras de diferentes puntos del montón o acopio cuidando de no contaminar la muestra con material de arrastre.
- 👉 Desde una tolva: Se extraen porciones en tres o más intervalos regulares durante la descarga, sin incluir el primer y último 10%.
- 👉 Desde medios de transporte: En este caso se elegirá uno de los procedimientos descritos anteriormente, prefiriéndose el que mejor se adapte a las condiciones existentes.

La comparación entre las muestras de fabricación y las muestras en sitio permite evaluar la influencia de las operaciones realizadas desde la salida de hormigonera hasta el sitio de colocación.

2.3.1.3. Tratamiento de las muestras

Cuando sea necesario transportar el hormigón muestreado debe hacerse en los recipientes de muestreo hasta el lugar donde se confeccionarán las probetas o se realizarán los ensayos.

Las muestras se deben proteger durante el período comprendido entre su extracción y la confección de las probetas o ensayos. Este período debe ser inferior a 15 minutos. Por lo general se recomienda emplear arpilleras, lonas húmedas o láminas de polietileno para cubrir el hormigón.

Antes de llenar los moldes o ejecutar los ensayos, remezclar la muestra con pala en el recipiente de muestreo o en la superficie de remezclado.



Fotos laboratorio L.E.M.C.O.

En la primera foto se puede ver la llegada al laboratorio de un set de tres probetas gemelas, las que corresponderían a una muestra. Se clasifica la información necesaria para su ensayo y se marcan. La segunda foto muestra la piscina de curado del laboratorio, donde aguardan las probetas para su correspondiente ensayo a la edad que corresponda.

2.3.2. Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas

La norma chilena NCh1037. Of77 “Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”, establece el método para efectuar el ensayo a rotura por compresión de las probetas ya mencionadas.

2.3.2.1. Medición probetas

Las probetas se retiran del curado inmediatamente antes del ensayo y se protegen con arpilleras mojadas hasta el momento en que se colocan en la máquina de ensayo.

Probetas cúbicas:

- 👉 Colocar el cubo con la cara de llenado verticalmente.
- 👉 Medir los anchos de las cuatros caras laterales del cubo (a_1 , a_2 , b_1 y b_2), aproximadamente a media altura y las alturas de las caras laterales (h_1 , h_2 , h_3 y h_4), aproximando a 1mm.
- 👉 Determinar la masa del cubo (M), aproximadamente a 50g.

Cuando se trate de probetas refrentadas, se debe medir y pesar antes del refrentado*.

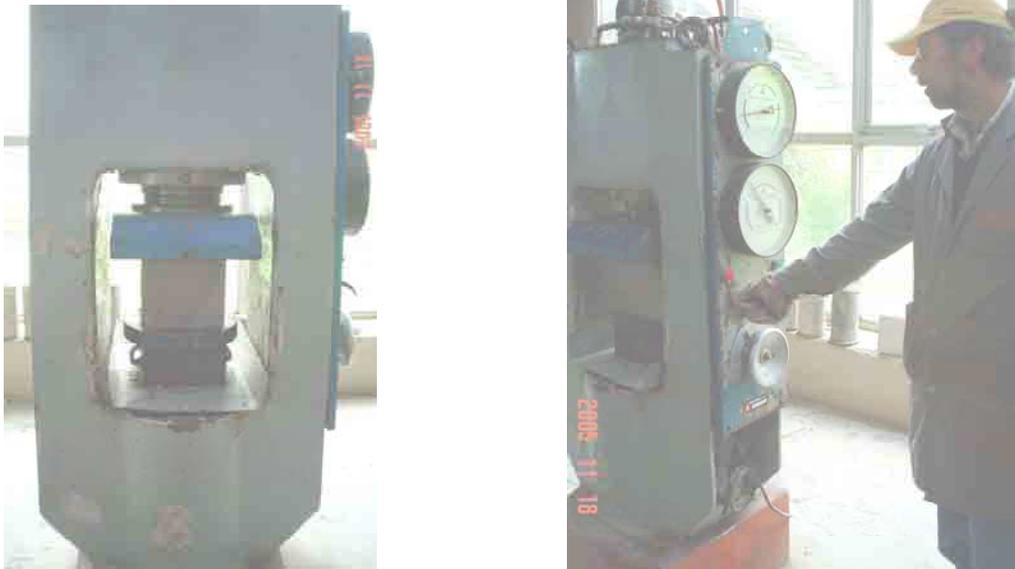
Probetas cilíndricas:

- 👉 Medir dos diámetros perpendiculares entre sí (d_1 y d_2) aproximadamente a media altura; y la altura de la probeta en dos generatrices opuestas (h_1 y h_2), antes de refrentar, aproximando a 1mm. Medidas se expresan en mm.
- 👉 Determinar la masa del cilindro (M) antes de refrentar, aproximando a 50g.

2.3.2.2. Ensayo

- 👉 Limpiar las superficies de contacto de las placas de carga y de la probeta y colocar la probeta en la máquina de ensayo alineada y centrada.
- 👉 Acercar la placa superior de la máquina de ensayo y asentarla sobre la probeta de modo de obtener un apoyo lo más uniforme posible.
- 👉 Aplicar carga en forma continua y sin choques a velocidad uniforme cumpliendo las siguientes reglas condiciones:
 1. Alcanzar una franca rotura en un tiempo igual o superior a 100 segundos.
 2. Velocidad de aplicación de carga no superior a 3,5 kgf/cm²/seg.
- 👉 Registrar la carga máxima P expresada en kg.

* Refrentado: procedimiento destinado a corregir defectos de planeidad y/o paralelismo entre caras con el fin de obtener la mejor coincidencia posible.



Fotos del laboratorio L.E.M.C.O. Ensayo de probeta.

2.3.2.3. Resultados

Se calculan las dimensiones promedio de las probetas con las medidas tomadas en los pasos anteriores, obteniéndose a, b, h y d.

- 👉 La resistencia a compresión del hormigón (R_c) se calcula por la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{P}{S}$$

donde:

S = superficie de carga (cm^2)

P = Carga máxima (Kgf)

Los resultados de resistencia a compresión se expresan con una aproximación igual o inferior a 5 kgf/cm^2 .

- 👉 La densidad aparente del hormigón (D_a) se calcula por la siguiente fórmula:

$$D_a = \frac{M}{V} (\text{g/cm}^3)$$

Donde:

M = masa de la probeta (g)

V = volumen aparente (cm^3)

Con fines prácticos, la densidad aparente se puede expresar en kg/m^3 .

CAPITULO III HERRAMIENTAS ESTADISTICAS UTILIZADAS

Para un mejor entendimiento del método utilizado en el logro de los objetivos de esta Memoria de Título, se describirán de manera general las herramientas estadísticas utilizadas para el análisis de datos.

3.1. DESCRIPCION DE DATOS

La descripción estadística, permite sintetizar la información que contiene un conjunto de datos de una variable X.

Tipos de variables:

- Cualitativas o Categóricas: (también se les llama atributos) aquellas cuyas observaciones no tienen carácter numérico. Describen cualidades.
- Cuantitativas: aquellas cuyas observaciones tienen carácter numérico. Estas se dividen a su vez en:
 1. Discretas: toman valores en un conjunto numerable.
 2. Continuas: toman valores en un conjunto no numerable (los números reales o un intervalo).

3.1.1. Medidas numéricas descriptivas

Se definirán las medidas numéricas que comúnmente se emplean en la descripción de conjuntos de datos. También se conocen como medidas resumen. Su aplicación es sobre datos homogéneos de una variable cuantitativa.

3.1.1.1. Medidas de centralización

Las medidas de centralización indican el valor medio de los datos. Existen diferentes caminos para definir el centro de gravedad de los datos:

- Media o media aritmética: es el promedio aritmético de las observaciones, es decir, el cociente entre la suma de todos los datos y el número de ellos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- Mediana : es el valor que separa por la mitad las observaciones ordenadas de menor a mayor, de tal forma que el 50% de estas son menores que la mediana y el otro 50% son mayores. Si el número de datos es impar la mediana será el valor central, si es par tomaremos como mediana la media aritmética de los dos valores centrales.

- Moda: es el valor más frecuente.

Debido a que sus propiedades son muy distintas ¿ Cuándo utilizar una u otra?

La media utiliza toda la información de los datos, es decir, tiene en consideración todos los valores de la distribución, tiene también como ventaja que es única. Como desventaja más importante está el hecho de que es muy sensible a la presentación de datos atípicos o extremos, que hacen que la media se desplace hacia ellos y como consecuencia es recomendable usarla en datos homogéneos. Otra desventaja es que puede no coincidir con uno de los valores de la variable.

La mediana utiliza menos información que la media puesto que no depende de los valores de la variable sino del orden que ocupa. Por este motivo tiene la ventaja de no estar afectada por observaciones extremas. Otra ventaja frente a la media es que es un valor de la variable.

Se aconseja calcular siempre las dos, ya que estas medidas diferirán mucho cuando la distribución sea muy asimétrica, lo que sugiere heterogeneidad en los datos.⁽¹⁾

3.1.1.2. Medidas de dispersión

Miden la variabilidad de los datos.

- Varianza (S^2) de la muestra: es el promedio del cuadrado de las distancias entre cada observación y la media aritmética del conjunto de observaciones.

$$S^2 = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$

La varianza se expresa en las mismas unidades que la variable, pero al cuadrado.

- Desviación típica o estándar (S): es la raíz cuadrada de la varianza.

$$S = \sqrt{S^2}$$

Aquí se evita el problema con las unidades físicas al cuadrado.

La información que entrega la desviación estándar y la media puede precisarse de la manera siguiente: entre la media \bar{X} y $\pm k$ la desviación estándar existe como mínimo, el

$$100 \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) \%$$

⁽¹⁾ PEÑA, Daniel. La Descripción de Datos. En su: Estadística Modelos y Métodos Tomo I Fundamentos. Madrid, Alianza Editorial, 1992. pp. 45-75.

de las observaciones. A través de la demostración de lo anterior se puede llegar a lo que se conoce como Desigualdad de Tchebychev, desigualdad que permite concluir que, en cualquier distribución se encuentran al menos:

- Entre la media y dos desviaciones estándar el 75%
- Entre la media y tres desviaciones estándar el 89%

No se harán las demostraciones, para no perder de vista el objetivo de este capítulo.

- Rango de una variable: Es la diferencia entre su valor máximo y mínimo.

$$R = x_{\max} - x_{\min}$$

Por su simplicidad, proporciona una rápida indicación de la variabilidad existente entre las observaciones, pero como medida de dispersión debe usarse con precaución ya que sólo toma en cuenta los dos valores extremos.⁽²⁾

- Rango intercuartílico: Es la diferencia entre el tercer y el primer cuartil o entre los percentiles 75 y 25.

3.1.1.3. Medidas de posición no centrales (cuantiles) ⁽³⁾

Los cuantiles son valores de la distribución que la dividen en partes iguales, es decir, en intervalos, que comprenden el mismo número de valores. Existen tres pero sólo definiremos los que se utilizaron en la Memoria:

- Percentil: Es el cuartil más común, se llama percentil p al menor valor superior al $p\%$ de los datos. Por ejemplo $p_{0,2}$ es el valor bajo el cual se encuentra el 20% de los valores de la distribución.
- Cuantiles: son aquellos valores que dividen la distribución en cuatro partes iguales.
 - Primer cuartil (Q_1): Es igual al percentil 25
 - Segundo cuartil (Q_2): Es igual a la mediana
 - Tercer cuartil (Q_3): Es igual al percentil 75

3.1.1.4. Medidas de dispersión relativas

Coeficiente de variación de Pearson: Cuando se quiere comparar el grado de dispersión de dos distribuciones que no vienen dadas en las mismas unidades o que las medias no son iguales se utiliza el coeficiente de variación de Pearson que se define como el cociente entre la desviación estándar y el valor absoluto de la media aritmética.

⁽²⁾ PEÑA, Daniel. La Descripción de Datos. En su: Estadística Modelos y Métodos Tomo I Fundamentos. Madrid, Alianza Editorial, 1992. pp. 45-75.

⁽³⁾ CANAVOS, George C. Probabilidad y Estadística. México, McGraw-Hill, 1988. 651 p.

$$CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

Para datos que representan distintas mediciones de una misma magnitud, s es un valor promedio del error de medición y CV indica la magnitud promedio del error como porcentaje de la cantidad medida. El CV en datos positivos de una población homogénea es típicamente menor que la unidad. Si es mayor que 1,5 conviene investigar posibles fuentes de heterogeneidad en los datos, como por ejemplo medidas con distintos instrumentos, medidas en distintos momentos temporales, etc.

3.1.1.5. Medidas de forma

- Medidas de asimetría: Nos miden la simetría de la distribución. Supongamos que hemos representado gráficamente una distribución de frecuencias: tracemos una perpendicular al eje de las X por \bar{x} . Diremos que la distribución es simétrica si existe a ambos lados el mismo número de valores, equidistantes dos a dos y cada par de puntos equidistantes con la misma frecuencia.

Coefficiente de asimetría de Fisher:

$$CA = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{nS^3}$$

Si la distribución es simétrica en el denominador tendremos el mismo número de desviaciones positivas como negativas y por tanto $CA = 0$.

Si $CA > 0$ la distribución es asimétrica positiva o asimétrica a derechas.

Si $CA < 0$ la distribución es asimétrica negativa o asimétrica a izquierdas.

- Medidas de apuntamiento o curtosis: Miden la mayor o menor cantidad de datos que se agrupan en torno a la moda. Sólo tienen sentido en distribuciones campaniformes, es decir, unimodales simétricas o ligeramente asimétricas. Si para valores próximos a la moda las frecuencias son más altas que en la distribución normal, la gráfica será muy apuntada en esa zona, y se dice que es de tipo leptocúrtico. Cuando son más bajas que en la distribución normal se dice que es de tipo platicúrtico. Cuando la distribución de frecuencias es igual de apuntada que la normal se dice que es mesocúrtica.

$$CA_p = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4}{nS^4}$$

3.1.1.6. Estandarización de una distribución de frecuencias

Supongamos que se hace la siguiente transformación a los datos:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

es decir, a cada valor de la variable le restamos la media y lo dividimos por la desviación estándar. Se trata de una transformación lineal.

Donde:

$$z_i = a + b x_i$$

$$a = \frac{-\bar{x}}{s}$$

$$b = \frac{1}{s}$$

Usando las propiedades de la media y de la desviación estándar es fácil demostrar que la nueva distribución de frecuencias tiene media aritmética cero y desviación estándar 1. Diremos entonces que la muestra o la distribución de frecuencias está estandarizada o tipificada y a la transformación anterior se le llama tipificación o estandarización. Así esta transformación nos permite dejar las variables adimensionales en cuanto a su escala de medida y, permite la comparación en análisis a posteriori.

3.2. HERRAMIENTAS GRAFICAS

Se puede entender de manera más fácil lo que sucede cuando los métodos estadísticos se aplican, si se grafican. El sólo ver los números no sirve para entender lo que realmente sucede con los datos. ⁽⁴⁾

Se definirán a continuación los diagramas o gráficos que se usaron en el proceso de análisis de datos.

3.2.1. Histograma de Frecuencias

El Histograma de Frecuencias (Frequency Histogram), proporciona una manera de resumir los datos que se miden en una escala de intervalo discreto o continuo. Se utiliza para ilustrar las características principales de la distribución de los datos.

⁽⁴⁾ SIEGEL, Andrew. Statistics and Data Analysis. United States of America, John Wiley & Sons Inc., 1988. 523 p.

El rango de los datos de la variable en estudio, se divide en clases o grupo. Para cada clase se dibuja un rectángulo con una altura igual a la frecuencia de los datos que pertenecen a ese grupo específico y un área proporcional al número de observaciones que están dentro de ese grupo.

El diagrama se traza con las clases en el eje horizontal y las frecuencias en el eje vertical, donde la frecuencia de cada clase es representada por las barras verticales.

Se define como *frecuencia de una clase*, al número de observaciones que pertenecen a esa clase.

3.2.2. Diagrama de Barras

El Diagrama de Barras (Bar chart) es similar al histograma, se diferencian en que las barras son separadas.

3.2.3. Diagrama de Sectores

El Diagrama de Sectores (Pie chart) es una manera de resumir un conjunto de datos categóricos o cualitativos. El diagrama contiene un círculo dividido en segmentos donde cada segmento es proporcional al número de casos en esa categoría.

3.2.4. Diagrama de Dispersión

El Diagrama de Dispersión (Scatterplots), es útil para investigar relaciones entre variables, porque ellos permiten visualizar fácilmente el rango, densidad y forma de los datos. Las observaciones de una o más variables se grafican como puntos sobre uno o más ejes, los cuales hacen posible representar visualmente las cualidades de los datos.

Cuando se grafica una variable, se pueden identificar los valores particulares de los datos que representan las regiones de densidad más alta, y para determinar si hay valores atípicos (outliers) presentes.

El eje horizontal cubre el rango de los datos, mientras el eje vertical no tiene ningún significado.

Desventaja: cuando se necesita identificar un punto en particular y éste está traslapado o cubierto por otro dato.

Cuando se grafican dos variables, el diagrama es bidimensional y sirve para ver algún tipo de relación entre ellas.

El patrón que siguen los puntos indican la fuerza y la dirección de la correlación entre las dos variables.

3.2.5. Diagrama de Caja y Bigotes

El Diagrama de caja y Bigotes (Box-and-Whisker Plot), es una manera de resumir los datos. Se utiliza con fines exploratorios para ilustrar las principales características de la distribución de los

datos, y para comparar la mediana y rango. También puede identificar posibles valores atípicos (outliers). Es particularmente útil cuando existe una gran cantidad de observaciones.

Los datos se dividen en 4 áreas de igual frecuencia o se obtienen los tres cuartiles Q_1 , Q_2 , Q_3 . La caja central está construida sobre el primer cuartil, la mediana y el tercer cuartil, respectivamente. Donde la mediana se representa como una línea vertical dentro de la caja. La media se traza como un punto.

Se calculan los límites admisibles superior e inferior que van a servir para identificar los valores atípicos.

$$LI = Q_1 - 1,5 (Q_3 - Q_1)$$

$$LS = Q_3 + 1,5 (Q_3 - Q_1)$$

Las líneas horizontales o bigotes se extienden de cada extremo de la caja central hasta el valor más alejado no atípico, es decir, que está dentro del intervalo (LI, LS).

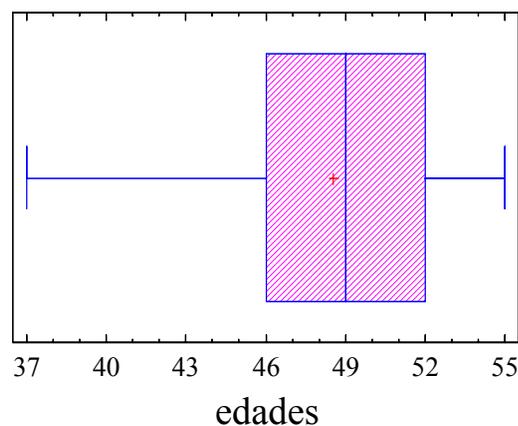
Los valores atípicos aparecen representados como puntos aislados fuera de los bigotes.

La mayor o menor longitud de los bigotes o líneas horizontales, dan una idea de mayor o menor dispersión respectivamente. También se puede comentar la asimetría de la distribución en función de dicha longitud.

La longitud de la caja central representa el rango intercuartílico de los datos. Cuanto más ancha la caja, es más grande la variabilidad de los datos.

Un ejemplo de este tipo de gráfico se puede apreciar en el gráfico2.

Gráfico 2.- Box-and-Whisker Plot



3.2.6. Diagrama de la Probabilidad Normal

El Diagrama de la Probabilidad Normal (Normal Probability Plot), se utiliza para probar un conjunto de datos y determinar si es o no probable que sea una muestra tomada de una población de distribución normal. El propósito de la prueba es producir un gráfico y determinar si la forma de puntos trazados forma un patrón lineal.

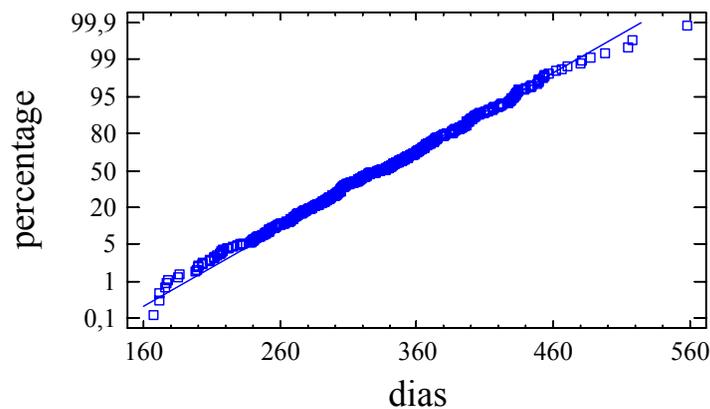
El diagrama consiste en un aritmético eje horizontal y un eje vertical a escala (intervalo), de manera que la función de distribución acumulativa se traza como una línea recta.

Los puntos se arreglan en orden ascendente, es decir, los valores se ordenan de menor a mayor.

Para observar mejor si los datos siguen un patrón lineal, se traza una línea recta de referencia que pasa por la mediana con la pendiente determinada por el rango intercuartílico.

Un ejemplo de este tipo de gráfico se puede apreciar en el gráfico 3.

Gráfico 3.- Normal Probability Plot



3.3. ANALISIS DE REGRESION SIMPLE (DOS VARIABLES)

“ El análisis de regresión trata de la dependencia de una variable, la *variable dependiente*, en una o más variables, las *variables explicatorias*, con el objeto de **estimar** o **predecir** la media o valor promedio (poblacional) de la primera con base en los valores conocidos o fijados (en muestras repetidas) de las segundas.” (Gujarati, 1981, p.4)

“Las técnicas de regresión proporcionan medios legítimos a través de los cuales pueden establecerse asociaciones entre las variables de interés en las cuales la relación usual no es causal”. (Canavos,1988, p.445)

La estadística no proporciona ni establece una conexión causal. Para aducir causalidad las ideas deben venir de fuera de la estadística, es decir, deben venir de consideraciones teóricas.

3.3.1. Método de Mínimos Cuadrados

3.3.1.1 Introducción

Existen diferentes métodos matemáticos estadísticos para poder estimar la función de regresión, pero en lo concerniente al análisis de regresión, el método más usado es el de los *mínimos cuadrados*.

Este método ofrece algunas propiedades estadísticas muy atractivas por lo cual se ha constituido en uno de los más eficaces y populares métodos de análisis de regresión.⁽⁵⁾

Se tratará de explicar este método de la forma más sencilla posible, sin incluir demostraciones, dejando claro los conceptos para el mejor entendimiento de la elaboración de la fórmula de predicción.

Como ya se explicó el diagrama de dispersión o nube de puntos permite visualizar la relación entre dos variables X e Y. Al representar el diagrama de dispersión podemos encontrar las siguientes situaciones:

- La nube de puntos se dispone de tal forma, que existe una función matemática cuyos puntos son una parte de su representación gráfica.
- Sin coincidir exactamente sus puntos con las de una gráfica de una función matemática, se aproximan a ella con mayor o menor intensidad.
- La nube de puntos presenta un aspecto tal, que no existe concentración de puntos hacia ninguna gráfica matemática, distribuyéndose de una forma uniforme en una región del plano.

En el primer caso se dice que existe una dependencia funcional o exacta entre las variables X e Y, es decir existe una función matemática tal que $Y = f(X)$.

En el segundo caso se dice que existe una dependencia estadística o aproximada entre las dos variables, $Y \approx f(X)$.

En el último caso diríamos que las variables son independientes y que no existe relación alguna entre ellas.

Del segundo caso se ocupa la teoría de la regresión.

Las técnicas de regresión tienen por objeto ajustar, es decir, encontrar una función que aproxime lo máximo posible la relación de dependencia estadística entre variables y predecir los valores de una de ellas: Y (Variable dependiente o respuesta) a partir de los de la otra (o las otras): X (variables(s) independiente(s) ó explicatorias(s)).

⁽⁵⁾ GUJARATI, Damodar. *Econometría Básica*. México, McGraw – Hill, 1981.

Llamaremos regresión de Y sobre X a la función que explica la variable Y (dependiente) para cada valor de la X (independiente).

$$Y \approx f(X)$$

La regresión es lineal cuando el modelo función de regresión seleccionado es una recta. En cualquier otro caso se dice regresión no lineal. La regresión será simple cuando sólo tengamos una variable independiente. Cuando tengamos dos o más variables independientes, la regresión será múltiple (no se tratará en este capítulo, debido a que no es el caso de esta Memoria).

El procedimiento básico general es el siguiente:

Elegir un tipo de función o curva que se crea que mejor relaciona las dos variables; esto se puede hacer observando la nube de puntos en un diagrama de dispersión.

Obtener la ecuación de la curva, de entre las infinitas de dicho tipo que hay en el plano, que mejor se adapte al conjunto de puntos. El objetivo de obtener esa ecuación será predecir el valor de la variable Y dado un valor x_0 de la variable X.

Lo anterior en el fondo es el problema de ajuste de una curva a los datos que se tienen. (Teoría de Regresión)

Además se debe obtener una medida del grado de esta asociación o correlación. Esto dará la fiabilidad de las predicciones que se haga con la ecuación. (Teoría de Correlación)

Este grado de asociación se calcula a través de una medida de dependencia lineal, llamada *covarianza*.

Al analizar dos variables cuantitativas de forma conjunta, el objetivo que se pretende es, por lo general, determinar si existe o no algún tipo de variación conjunta o *covarianza* entre ellas: si una variable aumenta, la otra también, o lo contrario.

La covarianza (S_{xy}) tiene la siguiente expresión:

$$S_{xy} = \frac{\sum_i \sum_j (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})n_{ij}}{n}$$

y ayuda a cuantificar la covariación entre dos variables del siguiente modo:

- Cuando $S_{xy} > 0$, hay una tendencia a que a mayores observaciones de X correspondan mayores observaciones de Y, directamente proporcionales.
- Cuando $S_{xy} < 0$, la tendencia resulta contraria; es decir, a mayor valor de X se suele encontrar menores valores de Y, indirectamente proporcionales.

Este valor dependerá de los valores de las variables, por tanto de sus unidades. Para poder eliminar las unidades y tener una medida adimensional se utiliza el coeficiente de correlación (r_{xy}):

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

siendo también invariante frente a transformaciones lineales (cambio de origen y escala) de las variables. Tiene las siguientes propiedades:

- Es un coeficiente adimensional.
- $-1 \leq r_{xy} \leq 1$
- Si hay relación lineal positiva $r_{xy} > 0$ y próximo a 1.
- Si hay relación lineal negativa $r_{xy} < 0$ y próximo a -1.
- Si no hay relación lineal r_{xy} se aproxima a 0.
- Si X e Y son independientes $S_{xy} = 0$ y por tanto $r_{xy} = 0$.

El análisis de correlación es conceptualmente muy distinto del análisis de regresión, aunque esté muy relacionado con éste. Su principal objetivo es medir la *fuerza o grado de asociación lineal* entre dos variables. En el análisis de regresión no interesa mucho esta relación, interesa en cambio, tratar de *estimar o predecir el valor promedio de una variable con base en los valores fijos de otras*.

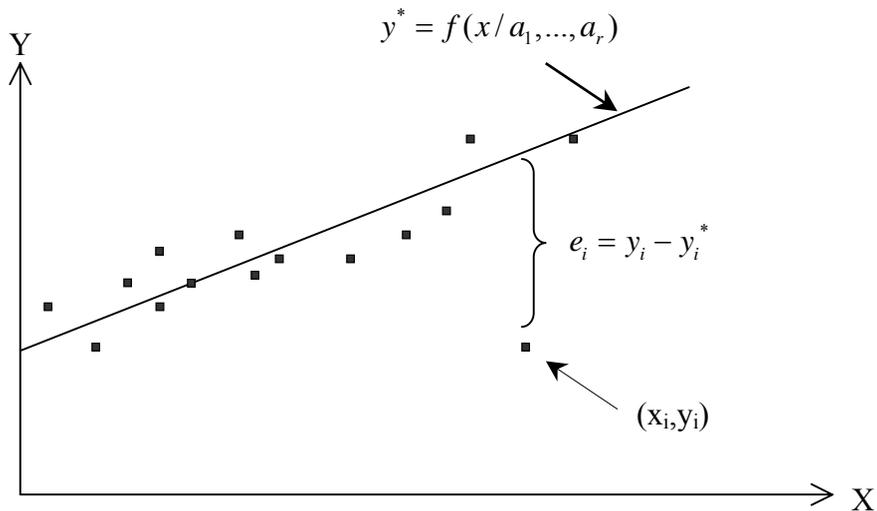
El modelo de regresión propuesto (la curva ajustada a los datos), debe ser relativamente sencillo y deberá contener pocos parámetros. Como se explicó anteriormente, un procedimiento muy útil para la selección inicial cuando se tiene sólo una variable explicatoria, es graficar la variable dependiente contra la variable explicatoria. Si esta gráfica revela una tendencia lineal, deberá suponerse un modelo de regresión lineal. Si es evidente alguna curvatura, deberá suponerse un modelo cuadrático o de mayor grado o algún otro tipo de modelo no lineal, para ajustarse a los datos. Luego la siguiente tarea es la de obtener estimaciones para los parámetros que intervienen en el modelo.

El método de los mínimos cuadrados encuentra las estimaciones para los parámetros en la ecuación seleccionada mediante la minimización de la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados de la variable dependiente (Y) y de aquellos proporcionados por la ecuación de predicción.⁽⁶⁾

⁽⁶⁾ CANAVOS, George. Probabilidad y Estadística. México, McGraw – Hill, 1988. 651 p.

3.3.1.2. Método de mínimos cuadrados

Dados los puntos $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, supongamos que hemos elegido una función $y = f(x/a_1, \dots, a_r)$, que queremos ajustar a ese conjunto de puntos y en la que intervienen r parámetros (a_1, \dots, a_r) . Se considera la nube de puntos correspondiente:



Para cada valor de X , (x_i) se tiene dos valores de Y :

- El valor observado en la muestra (o en la nube de puntos) y_i .
- Otro que se denominará teórico, y_i^* , que se obtendría al sustituir $x = x_i$ en la función.

Como se puede observar, para cada x_i se tiene una diferencia entre los dos valores de Y , que llamará residuo: $e_i = y_i - y_i^*$.

El método de los mínimos cuadrados consiste en determinar los parámetros (a_1, \dots, a_r) de tal forma que los residuos sean mínimos. Es decir, se busca minimizar la expresión:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i | a_1, \dots, a_r))^2$$

en otras palabras, se minimiza la suma de las distancias verticales de los puntos a la curva.

La condición necesaria para obtener el mínimo es que las primeras derivadas parciales respecto a cada uno de los parámetros se anulen, es decir,

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \Psi}{\partial a_1} = 0 \\ \frac{\partial \Psi}{\partial a_2} = 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial \Psi}{\partial a_r} = 0 \end{array} \right\}$$

Se resuelve este sistema, denominado sistema de ecuaciones normales, quedando determinados (a_1, \dots, a_r) , así como la correspondiente función.

Para dejar más claro lo anterior, a modo de ejemplo, se desarrollará un modelo de regresión lineal simple, por ser el más sencillo.

3.3.1.2. Modelo de regresión lineal simple

En el modelo de regresión lineal simple la función elegida para aproximar la relación entre las variables es una recta, es decir, $y = a + bx$ donde a , b son los parámetros.

A esta recta la llamaremos *recta de regresión de Y sobre X*.

Se va a deducir su ecuación usando el método de los mínimos cuadrados. Dado un valor de X , x_i , se tienen los dos valores de Y , el observado, y_i , y el teórico, $y_i^* = a + bx_i$. Así pues, se ha de minimizar:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bx_i))^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2$$

derivando respecto a al parámetro a y al parámetro b , e igualando a cero:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \Psi}{\partial a} = -2 \sum_i (y_i - a - bx_i) = 0 \\ \frac{\partial \Psi}{\partial b} = -2 \sum_i (y_i - a - bx_i)x_i = 0 \end{array} \right\}$$

dará un sistema de dos ecuaciones normales y dos incógnitas (a , b).

Resolviendo este sistema de ecuaciones (se aplican propiedades de sumatorias):

$$\left. \begin{aligned} \sum_i y_i &= \sum_i a + b \sum_i x_i \\ \sum_i x_i y_i &= a \sum_i x_i + b \sum_i x_i^2 \end{aligned} \right\}$$

$$-na = -\sum_i y_i + b \sum_i x_i \quad \longrightarrow \quad \underline{\underline{a = \bar{y} - b\bar{x}}}$$

$$\sum_i x_i y_i = (\bar{y} - b\bar{x}) \sum_i x_i + b \sum_i x_i^2$$

$$\sum_i x_i y_i = \frac{\sum_i y_i}{n} \sum_i x_i - b\bar{x}n\bar{x} + b \sum_i x_i^2$$

$$\sum_i x_i y_i - \bar{y}n\bar{x} = b \left(\sum_i x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)$$

$$S_{xy} = bS_x^2 \quad \longrightarrow \quad \underline{\underline{b = \frac{S_{xy}}{S_x^2}}}$$

y se obtiene que la recta de regresión de Y sobre X es $y = a + bx$ con los valores a y b anteriormente calculados, o bien la siguiente expresión:

$$y - \bar{y} = \frac{S_{xy}}{S_x^2} (x - \bar{x})$$

que sería la misma recta pero expresada en punto pendiente. A la pendiente b de la recta de regresión de Y sobre X se le denomina coeficiente de regresión de Y sobre X.

3.3.1.4. Supuestos

Los estimadores por mínimos cuadrados poseen ciertas propiedades deseables, pero para determinarlas es necesario formular las siguientes suposiciones:

- Los datos que se observan constituyen una muestra representativa de un medio acerca del cual el investigador desea generalizar.
- Se ha seleccionado la forma correcta de la ecuación de regresión. Esto implica que cualquier variabilidad en la variable dependiente que no pueda explicarse mediante el empleo de la ecuación de regresión, se debe a un error aleatorio (residuo).
- El valor esperado condicional del residuo e_i al X_i dado, es cero, es decir, el valor medio de e_i es cero.

$$E(e_i / X_i) = 0$$

- Los valores observados de la variable dependiente (Y) no se encuentran estadísticamente correlacionados, es decir, la covarianza de dos observaciones Y_i y Y_j , o entre los correspondientes valores aleatorios e_i y e_j , es cero para toda i distinta de j . (no autocorrelación)

$$\text{cov}(e_i, e_j) = 0 \quad i \neq j$$

- La varianza de e_i es σ^2 . Esta última recibe el nombre de *varianza del error* y, generalmente, no es conocida. Dado que las variables explicatorias no son variables aleatorias, la varianza de Y_i también es σ^2 para toda i y de esta forma es independiente del punto de observación. (homoscedasticidad o igual dispersión)

$$\text{var}(e_i / X_i) = \sigma^2$$

- Los puntos de observación o los valores de las variables explicatorias son fijos o se seleccionan con anticipación y se miden sin error. Para muchas situaciones prácticas, ambas condiciones no se cumplen. Afortunadamente, el método de mínimos cuadrados sigue siendo válido siempre y cuando los errores en los valores de las x sean pequeños al compararse con los errores aleatorios (residuos) y dado que éstos no dependan de los parámetros del modelo.

$$\text{cov}(e_i, X_i) = 0$$

Como comentario final sobre las suposiciones del procedimiento del método de mínimos cuadrados, se considerarán sólo mínimos cuadrados lineales, donde la palabra “lineal” significa que el modelo seleccionado es lineal en los parámetros.

Lineal en los parámetros significa que ningún parámetro en el modelo aparece como exponente o es multiplicado por o dividido entre cualquier otro parámetro.⁽⁷⁾

De la misma manera se considerará para referirse a un modelo de regresión lineal, al modelo que contiene parámetros lineales.

El modelo de regresión lineal que satisface los supuestos anteriores se conoce como “*modelo de regresión lineal general o clásico*”. Es clásico en el sentido que fue desarrollado por Gauss en 1821 y desde entonces ha servido como norma contra la cual se pueden comparar los modelos de regresión que no satisfacen los supuestos gaussianos.⁽⁸⁾

⁽⁷⁾ CANAVOS, George. Probabilidad y Estadística. México, McGraw – Hill, 1988. 651 p.

⁽⁸⁾ GUJARATI, Damodar. Econometría Básica. México, McGraw – Hill, 1981.

3.3.1.5. Bondad del ajuste. Coeficiente de determinación r^2

La medida de la “bondad del ajuste” tiene por objetivo encontrar en qué medida se ajusta la línea de regresión muestral a los datos.

Si todas las observaciones coincidieran con la línea de regresión, se obtendría un ajuste “perfecto”, lo que raras veces ocurre. Generalmente tiende a haber algunos e_i positivos y otros negativos, con la esperanza de que los residuos localizados alrededor de la línea de regresión sean lo más pequeños posible.

El coeficiente de determinación r^2 (caso de dos variables) o R^2 (regresión múltiple), es una medida que nos dice qué tan exactamente la línea de regresión muestral se ajusta a los datos.

Se define r^2 como:

$$r^2 = \frac{S_{y^*}^2}{S_y^2} \quad \text{o bien} \quad r^2 = 1 - \frac{S_e^2}{S_y^2}$$

donde S_e^2 es la varianza residual y $S_{y^*}^2$ es la varianza debida a la regresión.

Se define varianza residual, como la media de todos los residuos al cuadrado.

$$S_e^2 = \frac{\sum_i (y_i - y_i^*)^2}{n} = \frac{\sum_i (y_i - a - bx_i)^2}{n}$$

Se llama varianza debida a la regresión, a la varianza de los valores teóricos y_i^* . Se demuestra que $\bar{y}^* = \bar{y}$, y así pues la varianza debida a la regresión será:

$$S_{y^*}^2 = \frac{\sum_i (y_i^* - \bar{y})^2}{n}$$

se demuestra que, $S_y^2 = S_e^2 + S_{y^*}^2$

Es decir, la varianza total de la variable Y es la suma de dos varianzas: la varianza de Y^* , que representaría la parte de la dispersión o variabilidad de la variable Y explicada por la regresión, o sea, por la relación lineal con la variable X y la varianza residual que representaría la parte de la variabilidad no explicada por la regresión.

Así pues, cuando aumenta la varianza debida a la regresión, disminuye la varianza residual y el ajuste es bueno y al contrario.

El problema de la varianza residual es que vienen afectada por las unidades de medida y esto imposibilita la comparación de la dependencia entre grupos de variable.

Teniendo en cuenta la relación entre los diferentes tipos de varianzas, se puede obtener una medida relativa (es decir, que no dependa de las unidades y esté entre cero y uno) de la bondad de ajuste dividiendo la varianza debida a la regresión entre la varianza total de Y. Y eso es el coeficiente de determinación.

El coeficiente de determinación (multiplicado por cien) representa el porcentaje de la variabilidad de Y explicada por la recta de regresión, es decir por su relación con la variable X.

Los límites del coeficiente de determinación son $0 \leq r^2 \leq 1$

Si $r^2 = 1$ todos los residuos valen cero y el ajuste es perfecto; si $r^2 = 0$ el ajuste es inadecuado.

Una cantidad muy relacionada con el r^2 pero conceptualmente diferente es el coeficiente de correlación, ya visto anteriormente. Puede calcularse como $r_{xy} = \pm\sqrt{r^2}$.

CAPITULO IV ELABORACIÓN BASE DE DATOS

4.1. GENERALIDADES

Para lograr el principal objetivo de esta Memoria de Título, es fundamental crear una base de datos que contenga información representativa de la calidad de los hormigones que se confeccionan en la Provincia de Valdivia. Por esta razón se decidió trabajar con los ensayos realizados por el Laboratorio de Ensaye de Materiales de Construcción “L.E.M.C.O”.

L.E.M.C.O es una Institución Oficial de control de calidad autorizada por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, para certificar la calidad de los materiales de construcción en las áreas de mecánica de suelos, hormigones y prefabricados. Cuenta con personal calificado para realizar la atención a terceros y además tiene profesionales asesores en las distintas áreas de la ingeniería. A este laboratorio, que fue creado para cumplir una labor docente de apoyo a las carreras del área de la construcción e ingeniería, lo avalan sus casi 38 años de experiencia. Por último cabe destacar que este laboratorio depende del Instituto de Obras Civiles de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Austral de Chile.

El banco de datos confeccionado cuenta con una gran cantidad de ensayos de probetas de hormigón sometidas a la compresión, de los distintos proyectos de construcción y pavimentación realizados en la Provincia de Valdivia. Estas probetas se extrajeron de obras controladas durante el período comprendido entre Diciembre de 1999 y Junio del 2004.

La base de datos cuenta con hormigones del tipo:

- Premezclados, producidos por empresas conocidas a nivel nacional.
- Hormigones confeccionados en betoneras o mixer, producidos por los mismos ejecutores de la obra.

Además cuenta con hormigones confeccionados con cementos de alta resistencia y corrientes.

El objetivo de la confección de la base de datos, además de utilizarse para la elaboración de la fórmula de predicción, es la contrastación de los resultados obtenidos experimentalmente de ensayos a la compresión a los 28 días de edad por el laboratorio, con los resultados obtenidos desde los 7 días de edad, usando las fórmulas de predicción más usadas en el país, para así poder comparar sus comportamientos y precisión con los hormigones confeccionados en la Provincia de Valdivia.

Para tener una idea de las condiciones en que se fabricaron los hormigones controlados que pertenecen a la base de datos, se describirá muy brevemente la Provincia de Valdivia.

La Provincia de Valdivia se ubica en el extremo norte de la X región de Los Lagos, tiene una superficie de 18.429,5 Km² y posee una población de 356.396 habitantes, según último censo. Su capital provincial es la ciudad de Valdivia.

La provincia está constituida por 12 comunas:

- Comuna Valdivia
- Comuna Mariquina
- Comuna Los Lagos
- Comuna La Unión
- Comuna Panguipulli
- Comuna Paillaco
- Comuna Corral
- Comuna Río Bueno
- Comuna Lanco
- Comuna Lago Ranco
- Comuna Futrono
- Comuna Mafil

La comuna con más participación en esta base de datos, como se verá más adelante, es la Comuna de Valdivia. Por esta razón se describirán brevemente las condiciones climáticas de este lugar.

Valdivia se enmarca dentro de un entorno de llanos de sedimentación fluvial rodeado de bosques. El clima de la región es templado lluvioso con influencia mediterránea. Las temperaturas alcanzan los 17°C de media en los meses de verano (Diciembre - Enero - Febrero), mientras que en la época invernal bajan hasta los 9°C en promedio. Las precipitaciones son abundantes, alcanzando anualmente un caudal de 2.593 mm, repartidos durante todo el año pero con mayor caída de aguas lluvia entre los meses de Marzo y Septiembre.

Para la confección de la base de datos, se logró recolectar un total de 7.626 ensayos de probetas sometidas a la compresión, ensayadas a los 7 y 28 días de edad, las que fueron confeccionadas de acuerdo a la Norma Chilena NCh1017. EOf75 *“Hormigón - Confección y curado de probetas para ensayos de compresión y tracción”*.

Dentro de la base de datos se encuentran los tres tipos de probetas para ensayo, correspondiendo:

- El 57,81% de ellas a probetas cúbicas de 200 mm.
- El 35,59% de ellas a probetas cúbicas de 150 mm.
- El 6,6% de ellas a probetas cilíndricas de 150 mm.

Para obtener un banco de datos con valores de resistencias bajo iguales condiciones de rotura, se transformaron tanto como las probetas cúbicas de 150 mm y las probetas cilíndricas de 150 mm, en resistencias para cubos de 200 mm. Para esto se les aplicó el factor de conversión correspondiente de acuerdo a la Norma Chilena NCh170.Of85 “*Hormigón – Requisitos generales*” (Anexo A). En esta norma también se indica en el punto 14.2.2 “*Confección de probetas*”, que además de efectuarlas de acuerdo a la norma NCh 1017, se debe confeccionar en cada muestra a lo menos dos probetas gemelas* para el ensayo a 28 días de edad, o las especificadas para otras edades. La extracción de muestra del hormigón se realiza de acuerdo a la Norma Chilena NCh171.EOf75 “*Hormigón – Extracción de muestra del hormigón*”.

Se sabe que durante una colocación de hormigón se pueden tomar varias muestras, lo cual dependerá de la cantidad de m^3 de hormigón colocado y de las especificaciones requeridas en cada obra. Entonces una “*muestra*” estará compuesta por un set mínimo de tres probetas gemelas, las cuales se ensayan una a los 7 días y las otras dos a los 28 días de edad. En obras como las de pavimentación se exigen un número mayor de probetas gemelas, que además de hacer los ensayos de la forma antes descrita, se ensayan otras probetas a los 90 días de edad para verificar su resistencia en edades avanzadas.

De acuerdo a las Normas Chilenas NCh170. Of85 “*Hormigón – Requisitos generales*” y NCh1998. Of89 “*Hormigón – Evaluación estadística de la resistencia mecánica*”, cuando se confeccionan varias probetas ensayadas a los 28 días de edad, será necesario calcular la resistencia media del hormigón como “el promedio aritmético de los resultados de la resistencia mecánica del hormigón de un mismo grado y edad”, la cual deberá ser mayor que la resistencia especificada en el proyecto (f_c), para absorber la diferencia aleatoria que se origina en las variaciones propias del proceso de fabricación (equipos, materiales, etc.), del procedimiento del muestreo o de los ensayos. La totalidad de las muestras que componen la base de datos poseen dos o más probetas ensayadas a los 28 días de edad, por lo tanto se calculó la resistencia media para cumplir con las normas antes mencionadas.

En un comienzo cuando se digitaron los certificados de ensayos a la compresión del hormigón, para la confección de la base de datos, también se registraron ensayos realizados a los 3 y 14 días de edad, que no necesariamente en estas muestras se contaba con el ensayo a los 7 días.

La intención era elaborar fórmulas de predicción para estas edades, pero la cantidad de datos no era la necesaria para lograr una nube de puntos lo suficientemente densa como para obtener una fórmula que se pudiera usar en la práctica. Entonces el número real de probetas registradas incluyendo las edades de 3 y 14 días fue de 8.104 probetas ensayadas, lo que corresponde a un

* Probetas gemelas se le llama a las probetas confeccionadas de una misma muestra de hormigón fresco, conservadas y ensayadas en idénticas condiciones.

total de 2.669 muestras, de las cuales 2.515 corresponden a ensayos a los 7 y 28 días de edad, 48 son de muestras ensayadas a los 3 y 28 días y 106 provienen de ensayos a los 14 y 28 días de edad.

Teniendo claro a lo que se le llama **muestra**, el banco de datos contempló en un comienzo un total de 2.515 muestras en donde se encuentran las 7.626 probetas de ensayo de 7 y 28 días de edad. Posteriormente se llegó a un total de 1.967 muestras después de realizar un profundo análisis de los datos, en donde se realizó en primera instancia una unificación de hormigones donde se observó del universo de muestras las principales propiedades y características en común que pudieran tener entre ellas. Luego de este arduo trabajo se prosiguió con la elaboración de las fórmulas empíricas de predicción para lo cual se realizó un acucioso análisis gráfico y estadístico en la búsqueda de datos inusitados que pudieran afectar el propósito de esta Memoria de Título.

Por otra parte se debe destacar que la idea inicial de este proyecto era elaborar una fórmula de predicción para la Comuna de Valdivia, pero al analizar la base de datos, esta idea se amplió para que la fórmula pudiera ser aplicada a la Provincia de Valdivia.

La forma o método que se utilizó para el registro de la información de los hormigones estudiados, fue a través de una planilla electrónica en la cual se digitaron los datos contenidos en los certificados de ensayos de compresión para cada una de las muestras facilitadas por el Laboratorio L.E.M.C.O.

En el proceso de armar esta base de datos digital se registró toda la información que pudiera servir más adelante para verificar en caso de errores o dudas que se produjeran en el transcurso del análisis.

Las columnas de la planilla electrónica se conformaron de la siguiente manera:

- Número muestra
- Número certificado
- Ubicación
- Empleo del Hormigón
- Tipo de Hormigón
- Tipo de Cemento
- Tipo de Aditivo
- Fecha de elaboración muestra
- Tipo y medida de la probeta
- Cono de Abrams (cm)
- Densidad (Kg/Dm^3) y resistencia obtenida a los 7 días de edad (Kg/cm^2)
- Densidad (Kg/Dm^3) y resistencia obtenida a los 28 días de edad (Kg/cm^2)

Las últimas dos columnas se repiten según sea la cantidad de probetas confeccionadas para cada edad. Muchas fueron de 2 a los 7 días y 3 a los 28 días de edad.

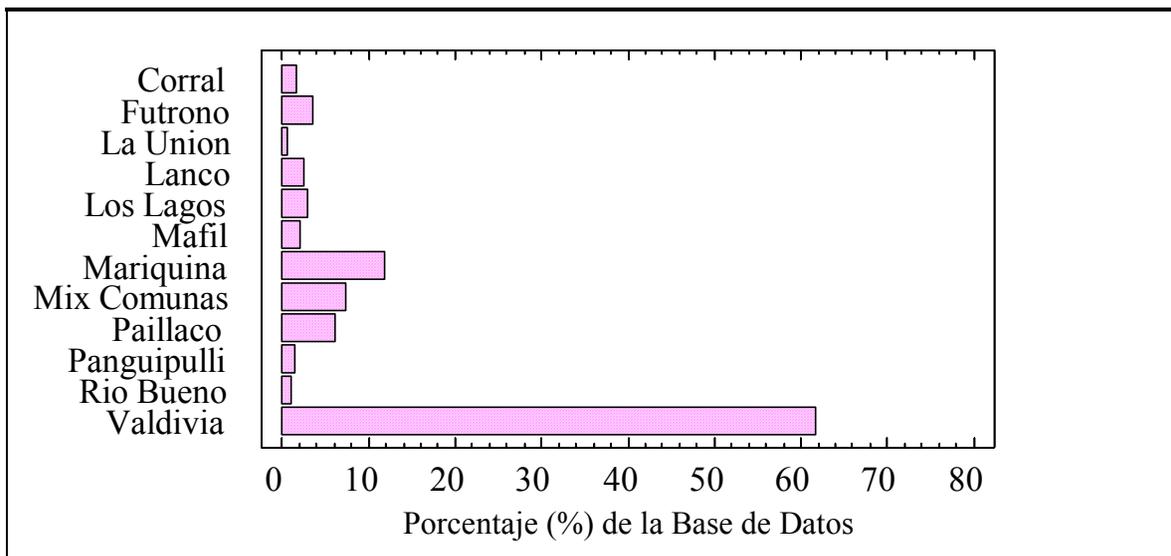
Estas mismas columnas se hicieron en otras hojas de cálculo para 3 y 14 días de edad.

Independiente de la cantidad de muestras utilizadas para el propósito de esta Memoria, a continuación se presentan algunos análisis gráficos interesantes de observar sobre lo que ocurre en nuestra provincia en cuanto a la construcción y uso de los hormigones.

Sólo para este objetivo utilizaremos la totalidad de los datos registrados, es decir, las 2.669 muestras.

El primer análisis gráfico tiene por objetivo visualizar que nivel de participación tiene cada comuna en la base de datos. Como se puede apreciar en el gráfico 4.

Gráfico 4.- Barchart para Ubicación Obra



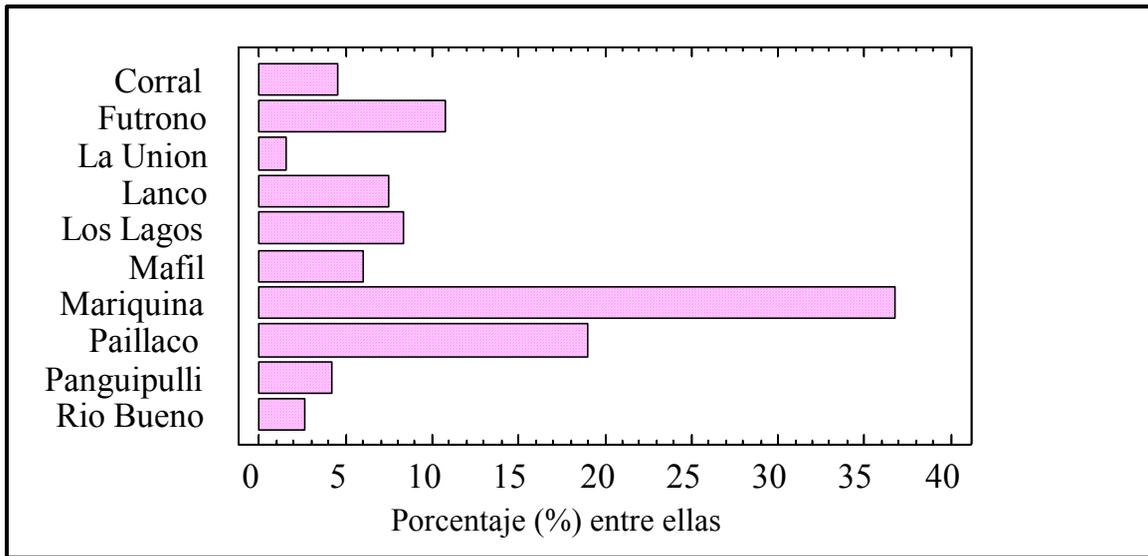
Se debe aclarar que se nombró Mix Comunas a las obras realizadas físicamente entre dos o más comunas de la provincia.

Lo primero que puede llamar la atención es que falta una de las 12 comunas que conforman la provincia, ésta es la Comuna de Lago Ranco. No es objeto de este proyecto analizar el “porqué” de esta ausencia, aunque se pueden especular varias razones.

Visualmente lo que más sobresale es que la Comuna de Valdivia es la que tiene el mayor porcentaje de participación, con el 61,45% del total, la comuna con menor participación, descontando Lago Ranco, es la Comuna de La Unión con un 0,45%.

Como la Comuna de Valdivia tiene el mayor porcentaje y la diferencia es tan grande con la comuna que la sigue, que es la Comuna de Mariquina con un 11,50%, se confeccionará con la intención de lograr visualizar el comportamiento de las comunas, otro gráfico (véase gráfico 5) en que no se incluya la comuna ya mencionada ni tampoco el Mix Comunas ya que no interesa en este caso.

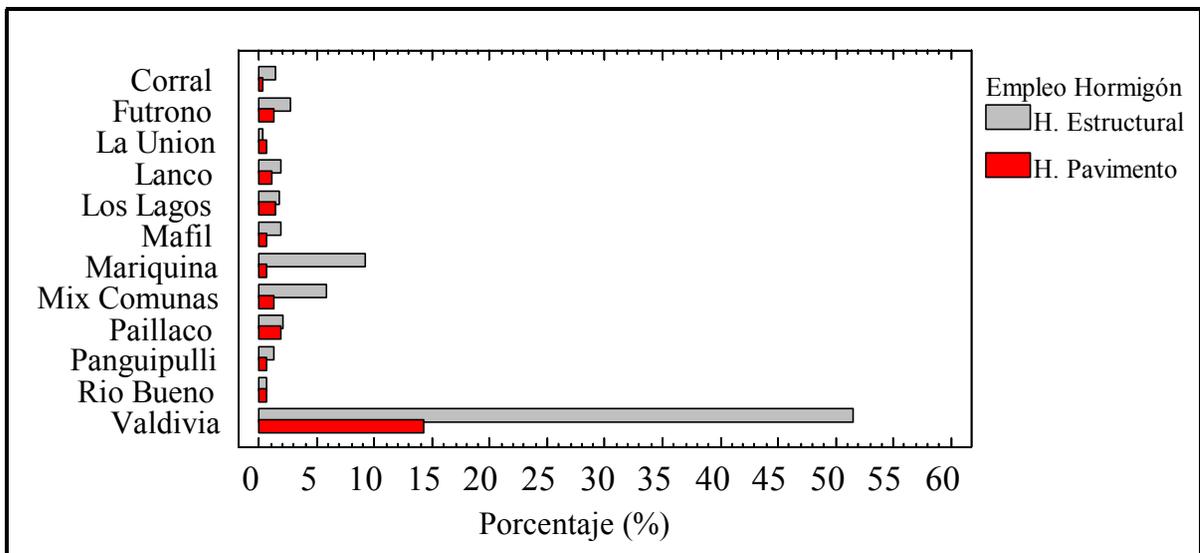
Gráfico 5.- Barchart para Ubicación Obra (modificado)



Obviamente la Comuna de Mariquina, con la construcción de Celco, tiene un mayor aporte en esta base de datos, las demás comunas están más o menos parejas, donde en su mayoría las obras corresponden a la construcción de viviendas sociales.

Veamos ahora cuántos hormigones son empleados para fines estructurales y cuántos para pavimentación por comuna en el gráfico 6:

Gráfico 6.- Barchart para las Comunas según Empleo Hormigón



Si analizamos el diagrama como el comportamiento de la Provincia de Valdivia, el gran porcentaje de los hormigones tuvo un uso estructural y en menor medida para pavimentación. En suma un 78,04 % del total de las muestras que contiene este tipo de información, fueron tomadas de hormigones utilizados con fines estructurales principalmente para edificación, mientras que el 21,96% fueron tomadas de hormigones utilizados en obras de pavimentación como aceras, calzadas, etc.

Esto está fuertemente influenciado por la gran actividad en obras de edificación realizadas en las Comuna de Valdivia, Mariquina y Mix comunas. Si no se tomaran en cuenta éstas, el panorama general sería mucho más equilibrado entre la cantidad de hormigones utilizados tanto para fines estructurales como para pavimentación.

Al realizar la unificación de datos se encontraron muestras que no tienen la suficiente información como para utilizarlas en el desarrollo de esta Memoria ya que en los certificados no estaban registrados todos los datos que se quiso almacenar en la base de datos. No está de más dejar en claro que la falta de información de los certificados de esas muestras afecta sólo el propósito de este proyecto pero en ningún caso afecta el objetivo para lo cuál el Laboratorio los emitió. Debido a lo anteriormente expuesto se procedió a retirar de la base de datos todas las muestras que no pudieran ser asociadas de una u otra manera en el proceso de unificación. También nos encontramos con hormigones especiales, hormigones livianos, etc., pero como la inmensa mayoría se trata de hormigones corrientes, sólo nos quedaremos con estos últimos retirando de la base de datos los que no pertenezcan a esa categoría.

Una vez terminado el proceso de unificación de datos y el posterior retiro de las muestras que no servían, la base de datos quedó conformada por un total de 1.967 muestras.

La siguiente etapa consiste en la clasificación o agrupación de datos para proceder con su respectivo análisis. Como se estudió en los primeros capítulos de esta Memoria, uno de los factores más importante como para tomar en cuenta y lograr los objetivos propuestos es la influencia de la edad en la resistencia del hormigón, la que varía de acuerdo con la clase de cemento y con su finura.

Tomando esto en cuenta la base de datos se dividirá en dos grupos según grado de los cementos utilizados en la fabricación de los hormigones:

- Hormigones fabricados con cementos corrientes, los que corresponden a un 61,40 % del total.
- Hormigones fabricados con cementos de alta resistencia, los que corresponden a un 38,60% del total.

4.2. MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE LOS HORMIGONES REGISTRADOS EN LA BASE DE DATOS.

Los materiales que se usan en la confección de los hormigones que se emplean en la provincia, son propios de la localidad con la excepción del cemento y aditivos, que son producidos por empresas nacionales que distribuyen sus productos a lo largo de todo el país.

Manteniendo la reserva de las marcas y nombres de las empresas dedicadas a la fabricación de hormigones, de cementos, aditivos y además de las constructoras que fabrican sus hormigones en obra, se tratará de mostrar la información más relevante para poder describir los materiales

usados en la confección de los hormigones de la provincia. La razón principal de esta decisión es la confidencialidad de los certificados que entrega L.E.M.C.O a las empresas y constructoras, o a cualquier persona que desee hacer uso de los servicios de este Laboratorio.

En primer lugar los cementos que se usaron fueron fabricados con componentes extraídos en nuestro país como el clínquer, puzolanas y escoria de alto horno. Estos cementos fueron producidos por empresas chilenas que distribuyen sus productos a lo largo de todo el país.

Estos cementos cumplen con las siguientes normas Chilenas:

NCh 147. Of69 “ *Cemento – Análisis químico*” y NCh 148. Of68 “*Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales.*”

Los tipos de cementos que se encuentran en la base de datos y que serían los más usados en la provincia se pueden ver en el cuadro 4:

**Cuadro 4.- Clasificación de los cementos más usados en la Provincia de Valdivia
(según base de datos)**

AGREGADO	DENOMINACION INN*	COMPOSICION	GRADO
NO	Portland	Clínquer	Alta Resistencia
Puzolana	Portland Puzolánico	Clínquer y hasta 30% de puzolana	Corriente y Alta Resistencia
Escoria de Alto Horno	Siderúrgico	Clínquer y entre 30%	Corriente y
		y 50% de Escoria	Alta Resistencia

Los agregados pétreos que se utilizan en la zona en su mayoría provienen del dragado del centro del río Calle - Calle, más o menos a la altura de Antilhue. Las empresas que se dedican a su extracción respetan la Norma Chilena NCh 163. Of79 “ *Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales.*”

El agua de amasado en su mayoría corresponde a agua potable, pero existen casos en que se recurre al uso de aguas subterráneas que son controladas para cumplir con todos los requisitos de la Norma Chilena NCh 1498 “ *Agua – Requisitos generales*”

La mayoría de los hormigones que conforman la base de datos, cuentan entre sus componentes con aditivos. Los principales aditivos que se usan en la confección de los hormigones fabricados y usados en la provincia son los siguientes:

- Plastificante reductor de agua
- Superplastificantes (estos en menor proporción)
- Plastificantes - retardadores
- Plastificantes - aceleradores

La aplicación y los efectos de estos aditivos fue extensamente descrito en el primer capítulo de esta Memoria.

4.3. CLASIFICACIÓN BASE DE DATOS

La base de datos compuesta por 1967 muestras, se clasificó en dos grandes grupos: hormigones confeccionados con cementos de alta resistencia y hormigones confeccionados con cementos corrientes.

El análisis de las medidas estadísticas y la búsqueda de valores inusitados se realizará en el Capítulo V: Elaboración Fórmula Empírica de Predicción. En este capítulo sólo se analizará la información que se pueda observar de los datos que componen cada grupo en forma general.

4.3.1. Hormigones confeccionados con Cementos Alta Resistencia

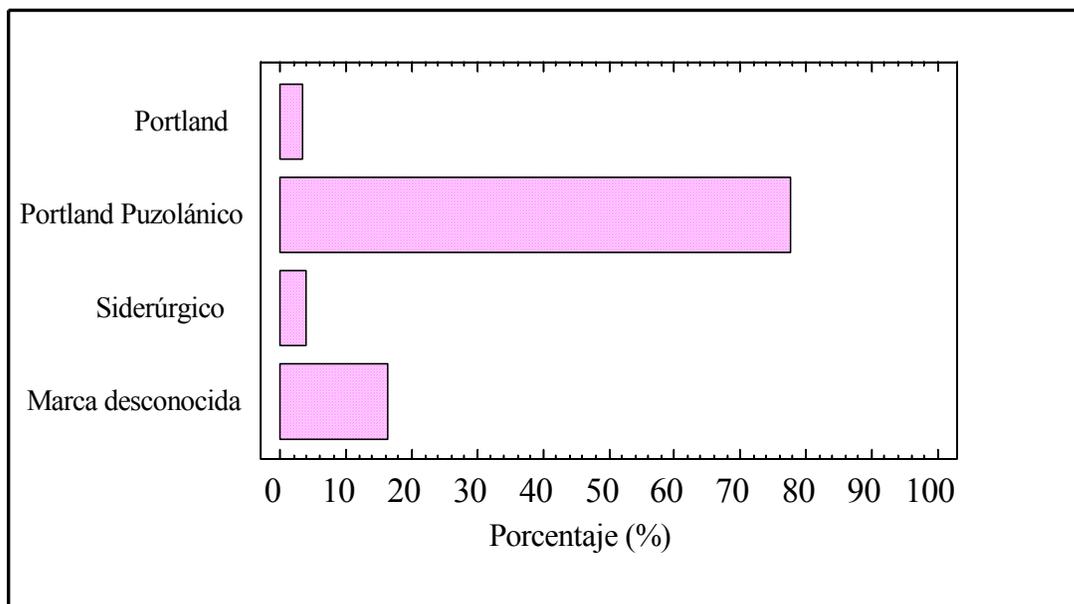
El 38,60 % del total de la base de datos conforman este grupo.

Los cementos que componen este grupo son los siguientes:

- Cemento Portland: 3,03%
- Cemento Portland Puzolánico: 77,34%
- Cemento Siderúrgico: 3,69%
- Cementos de marca desconocida*: 15,94%

Como se puede apreciar en el gráfico 7:

Gráfico 7.- Barchart para Tipos de Cementos de Alta Resistencia



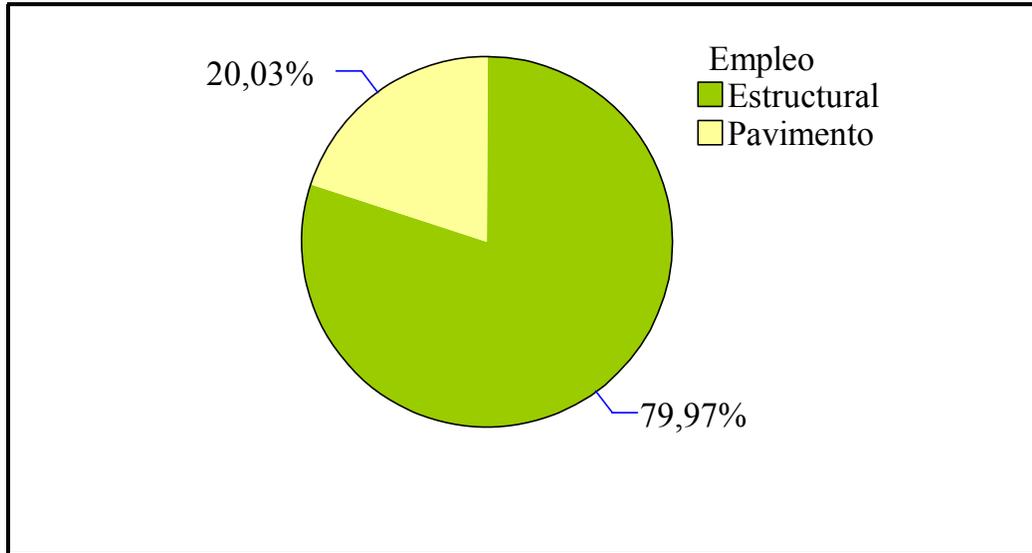
El empleo de estos hormigones fue de la siguiente manera:

* Sólo se sabía que eran cementos alta resistencia, pero al no conocer su marca comercial, no se pudo distinguir su denominación según INN.

- Fines Estructurales: 79,97%
- Fines Pavimentación: 20,03%

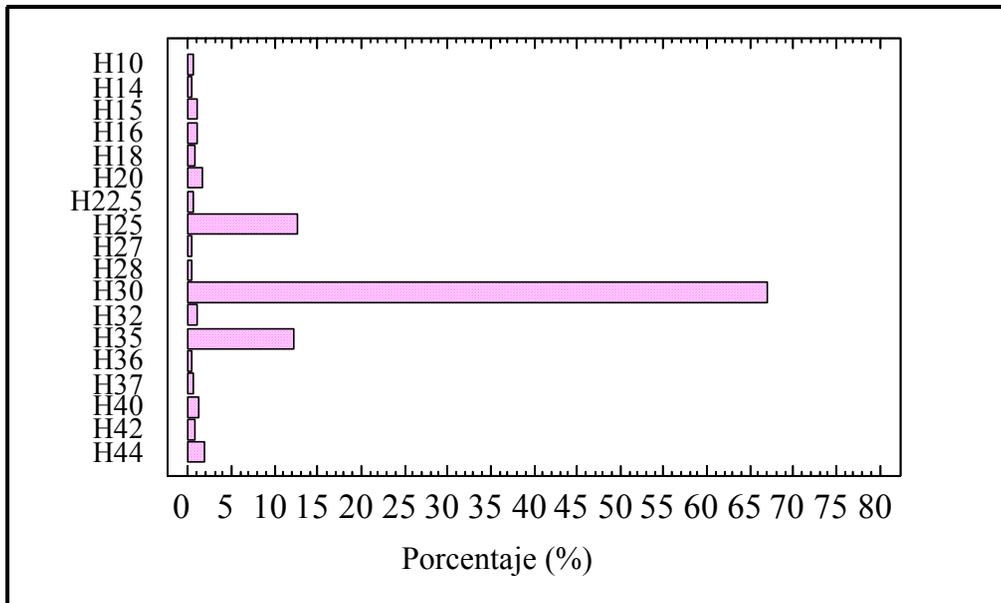
Como se puede observar más claramente en el gráfico 8:

Gráfico 8.- Piechart para Empleo Hormigón (C. Alta Resistencia)



Veamos también que calidades de hormigones han sido los más usados durante el período de tiempo que compone este estudio, en el gráfico 9:

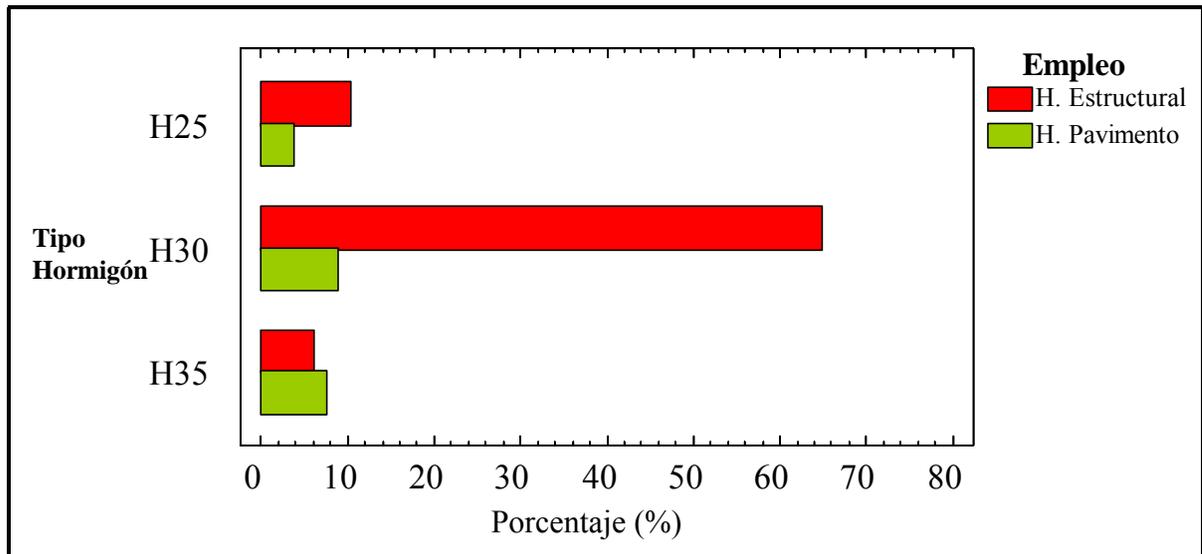
Gráfico 9.- Barchart por Tipo de Hormigón (C. Alta Resistencia)



Como se puede observar del diagrama anterior, la gran mayoría de los hormigones pertenece a los H30 con un 66,67% del total de datos que pertenece a este grupo. Los hormigones que lo siguen son los H25 y H35 con un 12,38% y un 11,99% respectivamente. Estos hormigones suman el 91,04% del total de muestras presentes en este grupo.

Quizás sería interesante ver gráficamente que uso se le dio a los hormigones que más se destacaron en la figura anterior. Esto se puede apreciar en el gráfico 10:

Gráfico 10.- Barchart para Tipo Hormigón (C. Alta Resistencia) según su Empleo



Como se puede apreciar los hormigones H35 fueron por poco más de su 50% utilizados para obras de pavimentación.

4.3.2. Hormigones confeccionados con Cementos Corrientes

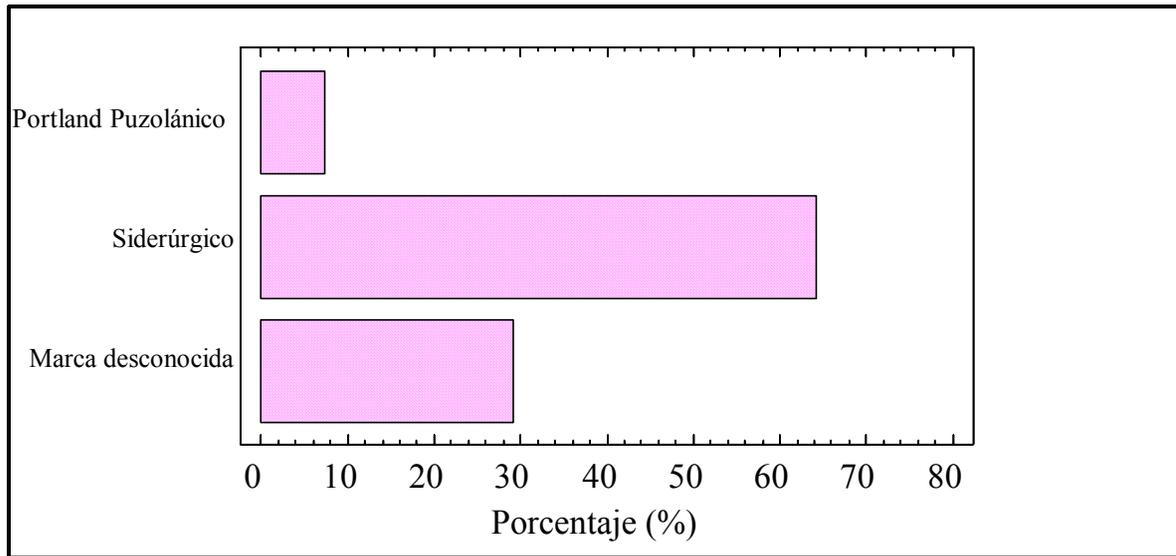
Este grupo está conformado por el 61,40 % de las muestras que contiene la base de datos.

Los cementos de grado corriente que podemos encontrar en este grupo son los siguientes:

- Cemento Siderúrgico: 64,07%
- Cemento de marca desconocida: 28,81%
- Cemento Portland Puzolánico: 7,12%

Esta distribución se puede apreciar mejor en el gráfico 11.

Gráfico 11.- Barchart por Clases de Cementos Corrientes

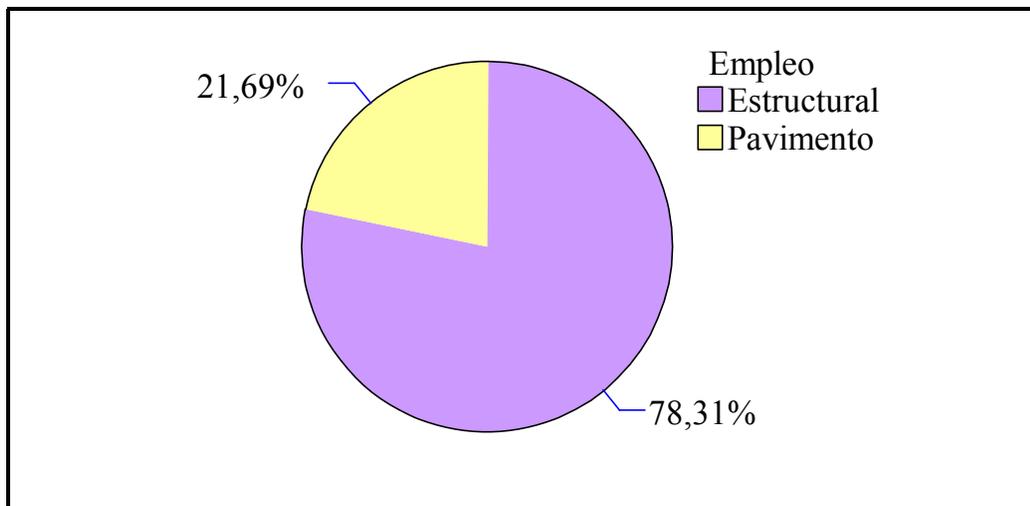


El uso de estos hormigones fue de la siguiente manera:

- H. Estructural: 78,31%
- H. Pavimentos: 21,69%

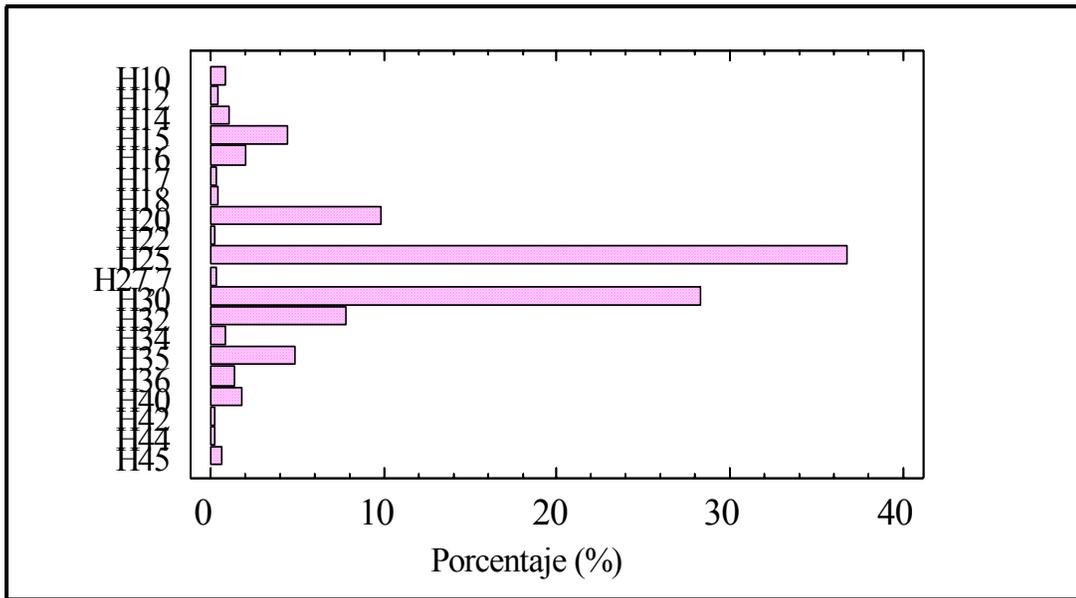
Lo que se puede apreciar de mejor manera en el gráfico 12:

Gráfico 12.- Piechart para Empleo de Hormigón (C. Corrientes)



Veamos que tipos de hormigones se presentan en este grupo de datos en el gráfico 13:

Gráfico 13.- Barchart por Tipos de Hormigón (C. Corrientes)

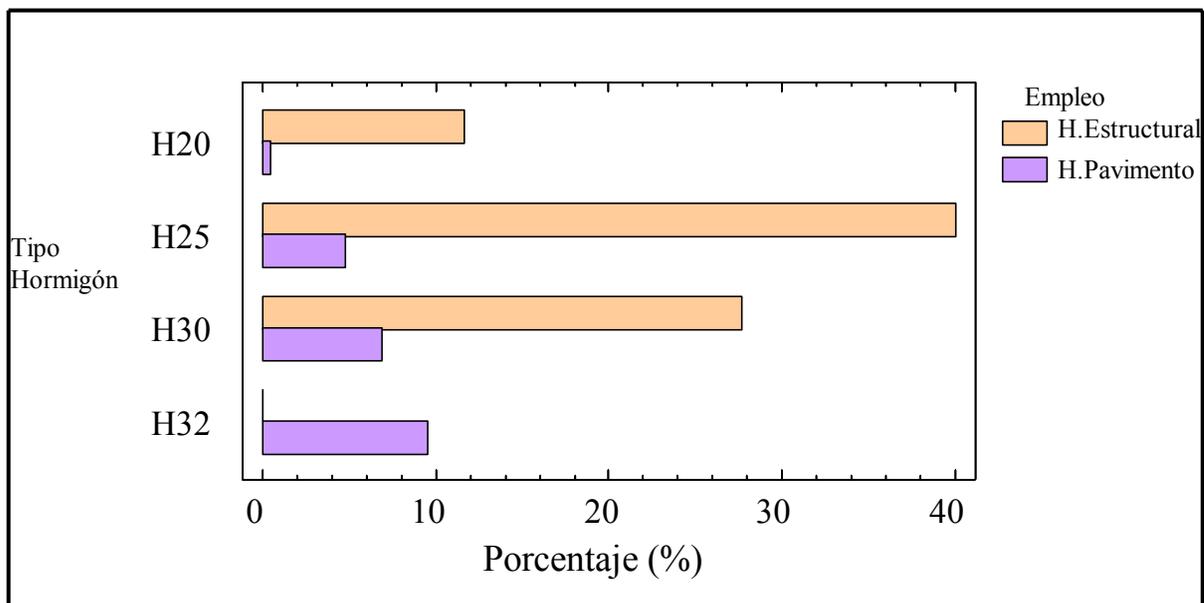


Vamos a destacar los hormigones que más ocurrencia tienen en este grupo de la base de datos.

En primer lugar se destacan los H25 con un 36,67% y le siguen los hormigones H30 con un 28,23%, con un poco más de diferencia aparecen los H20 con un 9,69% y los H32 con un 7,70%. Estos hormigones representan el 82,29 % del total de muestras que conforman este grupo.

Al igual que con el grupo anterior veamos en que se emplearon estos hormigones. Para esto observemos el gráfico 14:

Gráfico 14.- Barchart para Tipo Hormigón (C. Corriente) según su Empleo



Aquí se puede ver que los hormigones H32 en su totalidad fueron confeccionados para obras de pavimentación. Casi de la misma manera los hormigones H20 fueron fabricados para fines estructurales con un despreciable porcentaje destinado a pavimentos.

CAPITULO V ELABORACION FORMULA EMPIRICA DE PREDICCION

5.1. GENERALIDADES

En el presente capítulo se elaborarán dos fórmulas de predicción, una para los hormigones confeccionados con cementos de alta resistencia y otra para los hormigones confeccionados con cementos corrientes.

En este proceso fue necesaria la utilización de un programa estadístico capaz de desarrollar eficientemente este trabajo. Para ello, se probaron dos programas y se seleccionó el que tenía mejores herramientas gráficas y, principalmente, con el que se pudiese trabajar directamente con información almacenada en planillas electrónicas, por la sencilla razón que la base de datos se digitalizó en ese formato.

El objetivo de esta Memoria, además de la elaboración de la fórmula de predicción, es que ésta sea una fórmula sencilla y fácil de aplicar, tanto para el personal de laboratorios de autocontrol, durante la ejecución de la obra, como para el personal de laboratorios de control de calidad de hormigones. Para tal efecto, se seleccionaron los siguientes tipos de modelos para analizar su ajuste a los datos observados.

MODELO I	$Y = A + B \cdot X$
MODELO II	$Y = \exp(A + B \cdot X)$
MODELO III	$Y = A + \frac{B}{X}$
MODELO IV	$Y = \frac{1}{\left(A + \frac{B}{X}\right)}$
MODELO V	$Y = A + B \cdot \ln(X)$
MODELO VI	$Y = A \cdot X^B$
MODELO VII	$Y = A + B\sqrt{X}$
MODELO VIII	$Y = \exp\left(A + \frac{B}{X}\right)$
MODELO IX	$Y = (A + B \cdot X)^2$

Los modelos anteriores serán los que se comparen para seleccionar el mejor ajuste para los datos observados de cada grupo de hormigones.

Por último, se destaca que las unidades de trabajo para las resistencias son Kg/cm^2

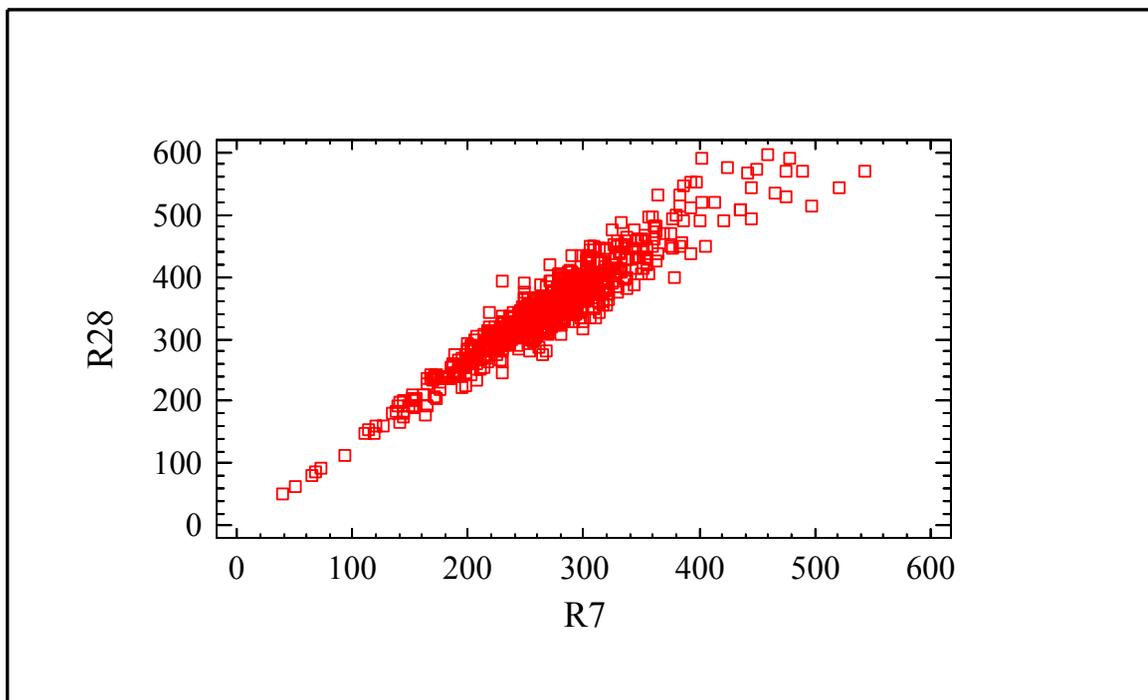
5.2. FORMULA DE PREDICCIÓN PARA HORMIGONES CONFECCIONADOS CON CEMENTOS DE ALTA RESISTENCIA

Para comenzar con el análisis, veamos el gráfico de dispersión de los datos observados (véase gráfico 15), con la finalidad de observar el tipo de relación o la tendencia de la nube de datos y conocer si existía sectores irregulares en ella.

En el eje Y se grafica la variable dependiente, en este caso R_{28} .

En el eje X se grafica la variable explicatoria, en este caso R_7 .

Gráfico 15.- Diagrama de Dispersión R_{28} v/s R_7 (Kg/cm^2)



Como se puede observar en el gráfico anterior, existe una pequeña porción de puntos que tiende a separarse de la nube de puntos, la razón de esta situación es que existen menos datos con ese tipo de resistencia, como se pudo observar en el capítulo IV, pero en ningún caso esos puntos muestran una irregularidad con respecto a la tendencia de la nube. Caso contrario se encuentra sumamente agrupada en los rangos donde se encuentran los hormigones que más han sido utilizados.

A simple vista se pueden reconocer algunos puntos que se destacan por estar levemente más alejados de la tendencia general de la nube, en especial para aquellos sectores donde ésta se encuentra muy densa. Al revisar esos puntos, se encontró con que el porcentaje de la resistencia a los 7 días con respecto a la resistencia especificada o por último comparada con la resistencia que se obtuvo a los 28 días de edad, era mucho menor o mucho mayor que la esperada.

Este tipo de problema se presenta a lo largo de la mayoría de los análisis de los dos grupos de hormigones.

Teóricamente, un hormigón confeccionado con cemento de alta resistencia a los 7 días de edad debiera lograr aproximadamente un 80% de la resistencia total.

Para estudiar como funcionaba en general este grupo se graficará otra nube de puntos (véase gráfico 16), pero sólo con el porcentaje que logran los hormigones a los 7 días de edad.

Se debe aclarar que para el cálculo de los porcentajes obtenidos por las muestras, se hizo con respecto a la resistencia obtenida a los 28 días. Ya que existe una irregularidad entre la resistencia que se obtiene a los 28 días versus la que se especifica. Por ejemplo, hormigones H30 perfectamente podrían ser H35, incluso llegarían a resistencias que corresponden a un H40.

Como se vio en el capítulo anterior, el hormigón de más resistencia utilizado en este grupo, fue el H44, y al observar la gráfica anterior uno puede ver que existen resistencias mayores a 500 kg/cm² llegando casi a los 600 kg/cm².

En la mayoría de los casos, en que se da la situación antes descrita, los hormigones provienen de plantas hormigoneras. También, se da el caso de hormigones que no llegan a cumplir la resistencia esperada a los 28 días, existiendo casos donde un H30, llega a la resistencia de un H10, este fue el caso más extremo, pero con menores diferencias existen muchos y también en su mayoría pertenecen a hormigones de plantas hormigoneras. Por supuesto, que para todas estas diferencias existe una tolerancia de aceptación, de los casos que se hablan son diferencias más allá de los límites tolerados.

Haciendo una pequeña investigación para buscar una explicación de lo que estaba sucediendo, se entrevistó con constructores, personal que trabaja en plantas hormigoneras e ingenieros en control de calidad, no sólo de la región, sino que también de la zona norte.

Esta investigación se hizo de manera informal, sólo para buscar ideas y ver que tan común era este tipo de irregularidades. Que la resistencia sea mayor a la especificada en términos de diseño o construcción, no tiene problemas mientras sea mayor, pero ¿qué sentido tiene que un H20 se venda como tal y sea en realidad un H30?. Esta pregunta fue la que motivó la investigación.

Las respuestas o ideas entregadas por las personas consultadas fueron variadas como se puede resumir a continuación:

- Existen casos donde en una obra, se avisa con anticipación el día del control de los hormigones y para “prevenir” que el control no entregue los resultados que se esperaban, se le pide un “cariñito” a la mezcla. Lo que explica de cierta manera las grandes diferencias en algunos hormigones.
- Según un constructor existe una modalidad más económica para pedir hormigones, éstos se piden con “dosis mínima” y el resultado son hormigones que entregan una mayor resistencia. Este punto no queda muy claro, ya que al consultar con empresas de cómo funciona lo de “dosis mínima”, esto no se conocía. Pero lo que él explicó es que se compra un H20 con “dosis mínima” y resulta un H25 o H30 y sale más barato.

- A raíz de lo ocurrido en una obra en Valdivia, conocida por todos los profesionales del sector, donde se cometió un grave error con los hormigones, se piensa que para asegurarse, se entregan hormigones con mayores resistencias, lo que no tiene mucha lógica ya que las plantas tienen sistemas de calibración y sistemas automatizados para la dosificación. El error cometido en esa obra fue producto de una mala calibración en las máquinas lo que tuvo un costo muy alto. Sólo es cuestión de un mayor control.

Además como se vio en el segundo capítulo, existe un aditivo plastificante reductor de agua, que cuando se usa como reductor del agua de amasado entre un 7 y 12%, sin modificar la docilidad del hormigón patrón, se obtienen fuertes incrementos en las resistencias mecánicas e impermeabilidad. Claro que esto a su vez incrementa los costos.

Cuando se usan como plastificante, es decir se aumenta la docilidad del hormigón pero se mantiene la razón agua/cemento, no se presentan variaciones en las resistencias mecánicas.

Cuando se usan retardadores, el efecto de estos aditivos no influyen en el desarrollo de las resistencias mecánicas iniciales, a pesar de lograr retardos de 3 a 5 horas con respecto al testigo.

Cuando se usan aceleradores, las resistencias mecánicas iniciales se aumentan para después tender a igualarse a edades superiores. Por supuesto, estas son las propiedades que se logran con un excelente y adecuado uso de los aditivos, pero el abuso de ellos perjudica de forma importante al resultado de los hormigones.

Con respecto a la situación de hormigones que obtienen una resistencia menor a la resistencia especificada no hay mayores dudas, ni tampoco se pensó necesario investigar ya que resulta lógico que esto se debe a una mala dosificación, no hay un mayor control sobre las cantidades de cemento utilizadas, o las cantidades de aditivos, que con un mal uso tienden a producir hormigones de mala calidad.

Para ambos casos también está la probabilidad de que las muestras no se hayan tomado debidamente, o no se haya respetado las medidas de curado o transporte, o también está la posibilidad del error en el ensayo.

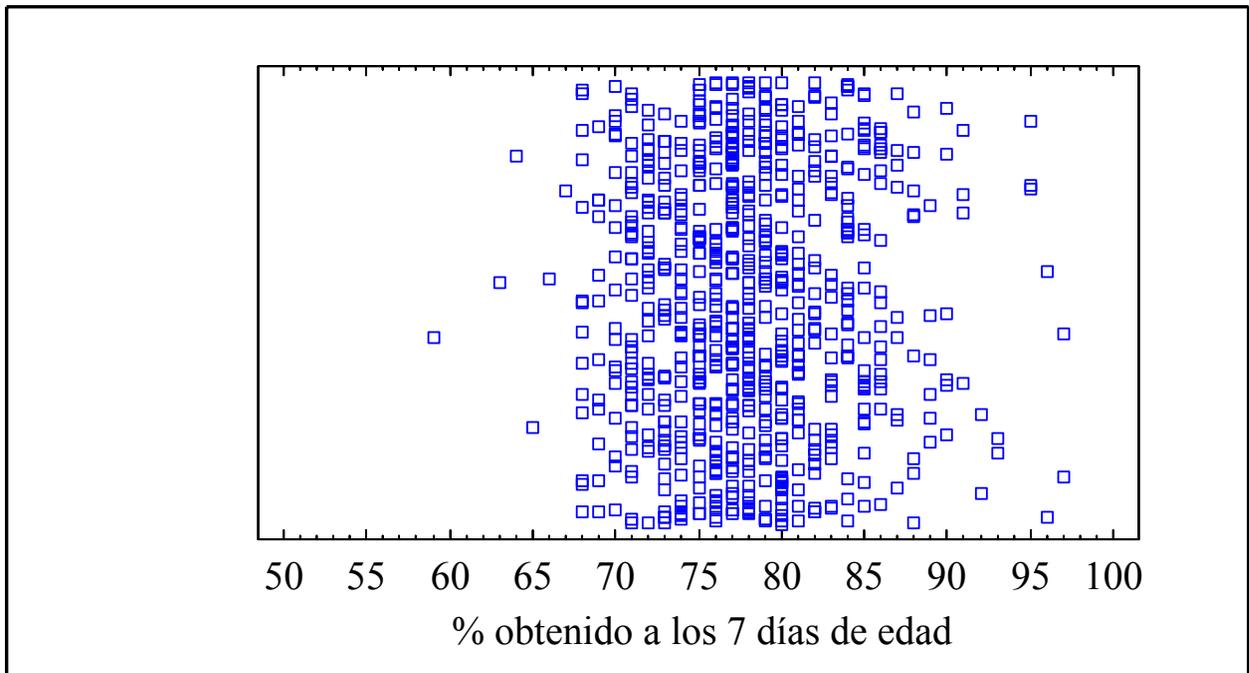
Por último, durante la pequeña investigación se facilitó una base de datos de casi 6 años con hormigones producidos en el norte y estas situaciones casi no se dan.

Todo el análisis anterior no afecta en realidad el propósito de esta Memoria de Título ya que sólo se toman en cuenta las resistencias obtenidas, no importando el hormigón especificado, ya que el propósito era obtener una fórmula sencilla y fácil de usar y que no dependiera, del tipo de hormigón. Por ejemplo existen algunas fórmulas, no muy usadas en el país, donde sólo se aplican a hormigones mayores a H20 o son sólo aplicables en un rango de resistencia. Pero si va a interesar el porcentaje que se obtiene a los 7 días de la resistencia final.

Los hormigones que presentaron problemas como, que la resistencia a los 7 días fue mayor que a la de los 28, se retiraron de la base de datos, para fines de tratamiento estadístico.

Los demás hormigones se dejaron para mantener bajo una situación real y tácitamente aceptada, la información que entrega esta base de datos.

Gráfico 16.- Diagrama de Dispersión del Porcentaje Obtenido a los 7 días de edad



Ahora se puede observar más claramente cuales son los puntos que aparecen levemente alejados de la tendencia general de la nube.

Existen porcentajes incluso menor a los que se obtendrían teóricamente con cementos corrientes.

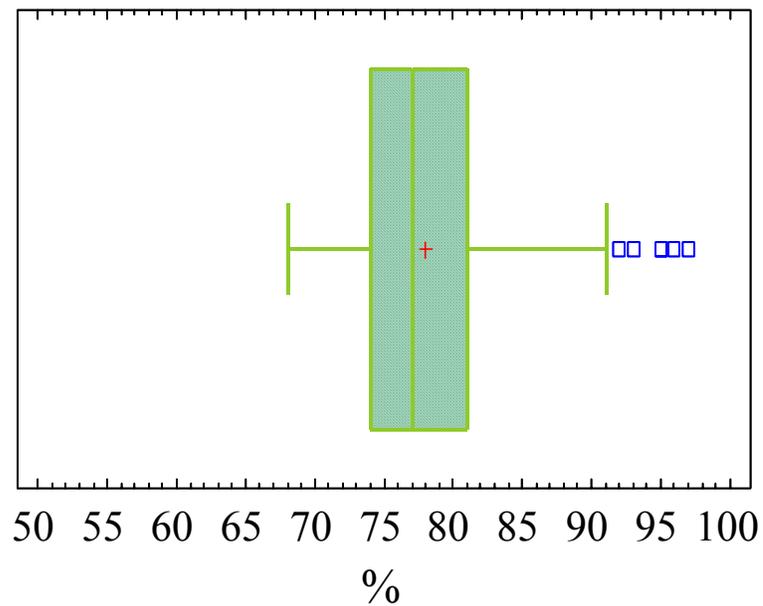
Y otros con porcentajes demasiado altos, seguramente provocados por el uso de aditivos, aunque existe un mínimo porcentaje de hormigones que no usan aditivos en la base de datos.

De lo anterior se puede concluir que estos datos que tienden a estar por sobre o por debajo de la nube densamente formada, serían posibles valores atípicos o outliers.

Sin necesidad de mayor análisis se retirarán del grupo los valores menores al 68%, que son en total 6 muestras, siendo demasiados tolerantes incluso al aceptar todos aquellos datos menores al 75%, pero por ser éstos un 28,6% de los datos de este grupo.

Para un mejor análisis de los demás datos se verá el diagrama de Box de los porcentajes, como se presenta en el gráfico 17:

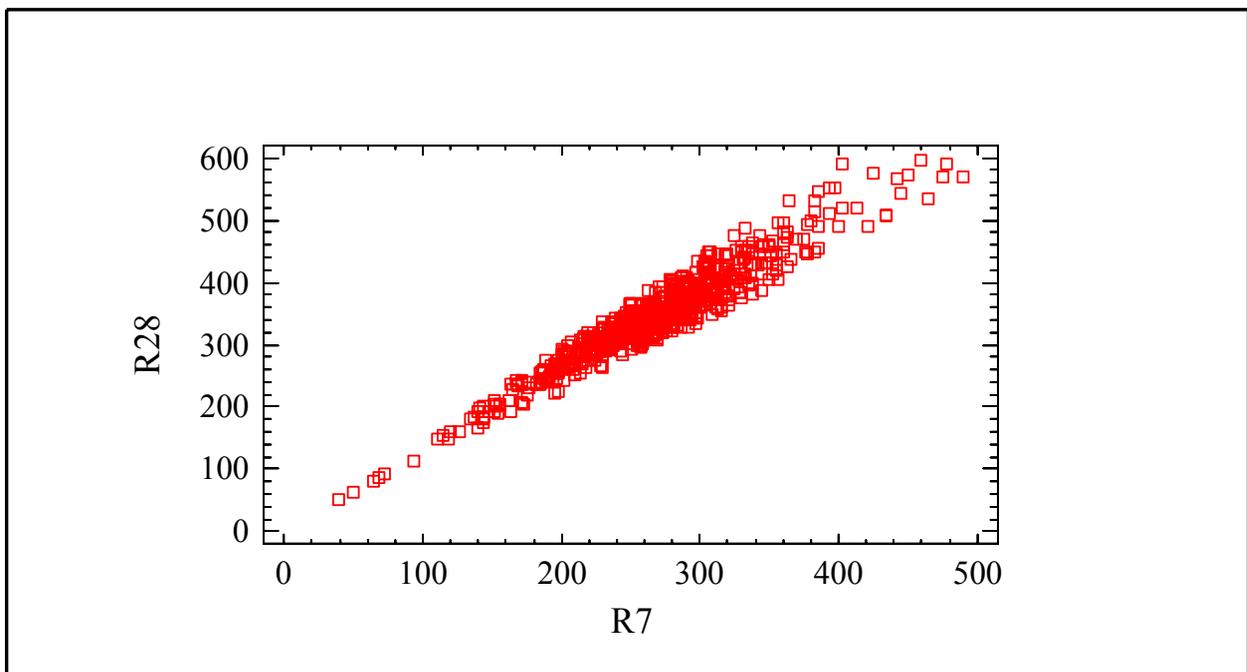
Gráfico 17.- Box-and-Whisker Plot de los Porcentajes



Los puntos que aparecen más allá de los “bigotes”, son posibles outliers. Al hacer el chequeo de estos datos, que corresponden a un 1,32% de los datos, se decidió retirarlos.

Quedando el diagrama de dispersión como en gráfico 18:

Gráfico 18.- Diagrama de Dispersión de R_{28} v/s R_7 (modificado)



Aunque aún se ven algunos puntos con tendencias a alejarse, se dejarán por el momento, y se estudiarán, a través de los residuales, ya que seguramente ahí quedará más clara su situación.

5.2.1. Ajuste de la Curva

Utilizando el programa estadístico se verá cuál es el mejor modelo que se ajusta a los datos que conforman la base de datos. Para el proceso, el programa utiliza el método de los mínimos cuadrados. A continuación se mostrarán los resultados obtenidos por el análisis:

REGRESIÓN SIMPLE R_{28} VS. R_7

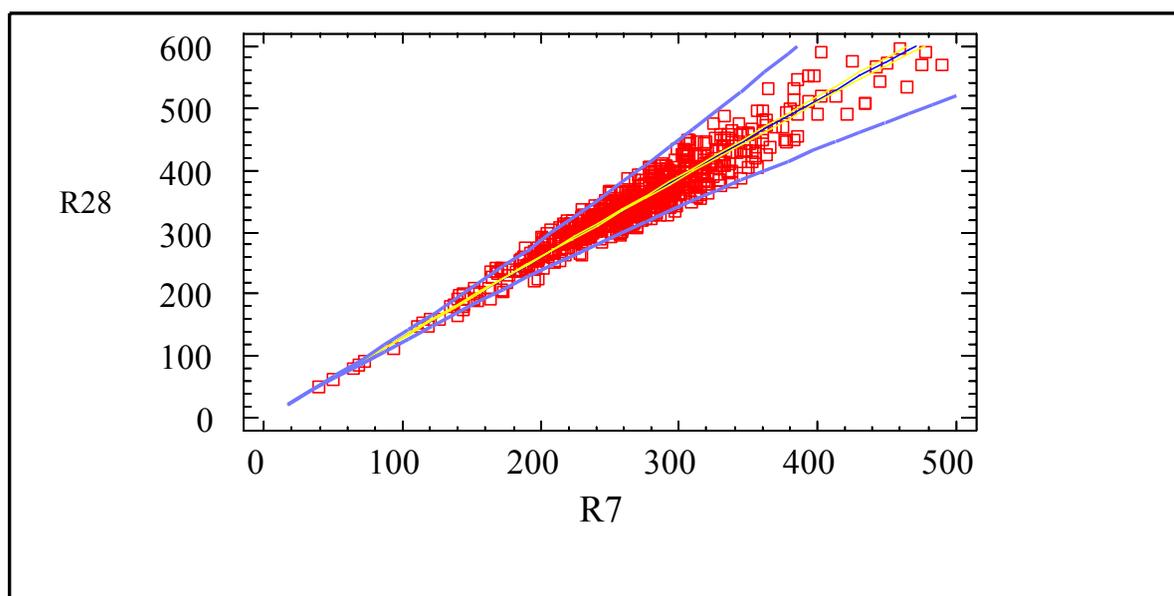
Comparación entre los Modelos Ajustados a los Datos

Modelos	Correlación	R^2 corregido
Modelo I	0.9541	91.02 %
Modelo II	0.9158	83.88 %
Modelo III	-0.7528	56.67 %
Modelo IV	0.9873	97.47 %
Modelo V	0.9246	85.50 %
Modelo VI	0.9688	93.86 %
Modelo VII	0.9510	90.43 %
Modelo VIII	-0.8994	80.89 %
Modelo IX	0.9471	89.69 %

En el cuadro anterior se pueden ver los resultados de ajustar los distintos modelos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo IV es el que logra el más alto valor de R^2 con un 97,4744%. Por lo tanto, esa será la fórmula de predicción.

Ahora se mostrará gráficamente (véase gráfico 19), como queda representado el modelo IV ajustado a los datos:

Gráfico 19.- Ajuste del Modelo IV a los datos



En el diagrama, las líneas azules indican los límites de predicción del modelo. Las líneas amarillas muestran los límites de confianza, es decir, el nivel de confianza es del 95%.

El resultado entregado por el programa es el siguiente:

Regression Analysis - Double reciprocal model: $Y = 1/(a + b/X)$

Dependent variable: R28

Independent variable: R7

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	0,0000721237	0,000019084	3,77927	0,0002
Slope	0,755655	0,00446831	169,114	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0,0010028	1	0,0010028	28599,64	0,0000
Residual	0,0000259469	740	3,50634E-8		
Total (Corr.)	0,00102875	741			

Correlation Coefficient = 0,987309

R-squared = 97,4778 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 97,4744 percent

Standard Error of Est. = 0,000187252

Mean absolute error = 0,000147066

En suma, los resultados del ajuste del modelo seleccionado para describir la relación entre R_{28} y R_7 , es la siguiente:

$$R_{28} = \frac{1}{\left(0,0000721237 + \frac{0,755655}{R_7}\right)}$$

Como el P- Value en el análisis de la varianza es menor que 0,01, existe una relación estadísticamente significativa entre R_{28} y R_7 , con un nivel de confianza del 99%. Por lo tanto el modelo planteado permite modelar estadísticamente los datos.

El coeficiente de determinación R^2 corregido, mide la bondad del ajuste del modelo, entonces el modelo se ajusta en un 97.4744% a los datos, es decir, el modelo estimado recoge el 97,5% de la variabilidad total explicada.

El coeficiente de correlación es de 0,987309, lo que indica que existe una fuerte relación entre las variables además, al ser positiva indica que como era de esperarse esta relación es directamente proporcional.

El error estándar de los estimados muestra la desviación estándar de los residuos, este valor es 0,000187252.

El MAE (Mean Absolut Error) es de 0,000147066, lo que indica el promedio de los valores de los residuos.

El intercepto indica el nivel promedio de R_{28} cuando R_7 es igual a cero, en este caso es aproximadamente cero, lo que es muy bueno ya que es lógico que si la resistencia a los 7 días es cero, a los 28 también lo será. Otra forma de interpretar es que el intercepto corresponde al efecto medio o promedio sobre R_{28} , de todas las variables omitidas del modelo de regresión.

5.2.2. Análisis gráfico de los residuos

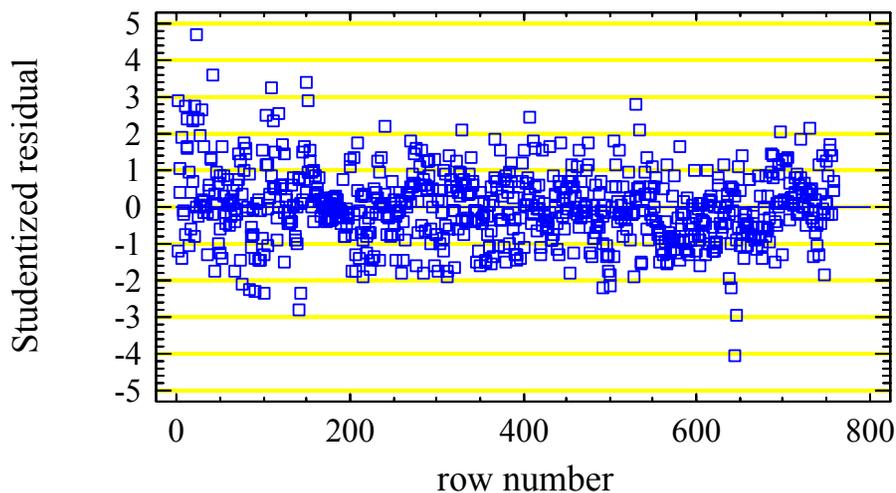
Con el análisis de los residuos se puede estudiar si el modelo es correcto y si todas las suposiciones han sido satisfechas.

Lo que se busca es, que en ninguno de los gráficos a analizar exista en los residuos algún tipo de patrón entre ellos, es decir, deben aparecer sin estructura, totalmente al azar.

Para los gráficos se usarán el criterio de los residuos estandarizados, que son muy útiles ya que miden cuantas desviaciones estándar de cada valor observado de R_{28} se desvían del modelo ajustado usando todos los datos excepto esa observación. Si los valores son mayores al rango $[-2,2]$, nos encontramos frente a residuos inusuales, es decir se desvían 2 desviación estándar del modelo ajustado. Si existen mayores a 3 en valor absoluto estamos frente a posibles outliers.

Se debe aclarar que en este proceso de identificación de posibles outliers, al retirar los valores de la fórmula, ésta cambiará, y por lo tanto, también cambiarán los valores de los parámetros de la fórmula, pero el modelo seguirá siendo el mismo. Empecemos el análisis con el gráfico 20:

Gráfico 20.- Residual Plot



En el gráfico anterior se observan un total de 29 residuos inusuales habiendo varios mayores a 3, al chequear estos valores se encuentra con que varios eran outliers, y se procedió a retirarlos de la base de datos.

Quedando los siguientes cambios:

Regression Analysis - Double reciprocal model: $Y = 1/(a + b/X)$

Dependent variable: R28
Independent variable: R7

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	0,0000601703	0,000018605	3,23409	0,0012
Slope	0,757119	0,00434303	174,33	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0,000998931	1	0,000998931	30390,88	0,0000
Residual	0,0000239618	729	3,28694E-8		
Total (Corr.)	0,00102289	730			

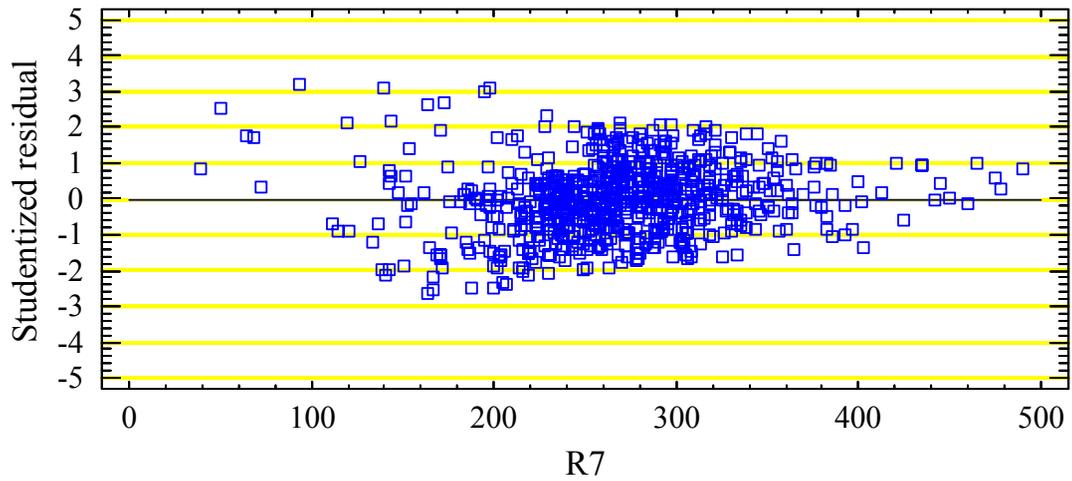
Correlation Coefficient = 0,988218
R-squared = 97,6574 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 97,6542 percent
Standard Error of Est. = 0,000181299
Mean absolute error = 0,00014316

Lo más importante del cambio es el pequeño aumento de la bondad del ajuste, siendo ahora de un 97,6574 %.

Al analizar en general cuales fueron los datos que quedaron en la base y que participan en la nueva fórmula, se encontró que el rango entre los porcentajes a los 7 días quedó entre el 68% y el 89%. Y el total de datos disminuyó a 731 muestras.

Se seguirá con el análisis de los residuos en los gráficos 21 y 22.

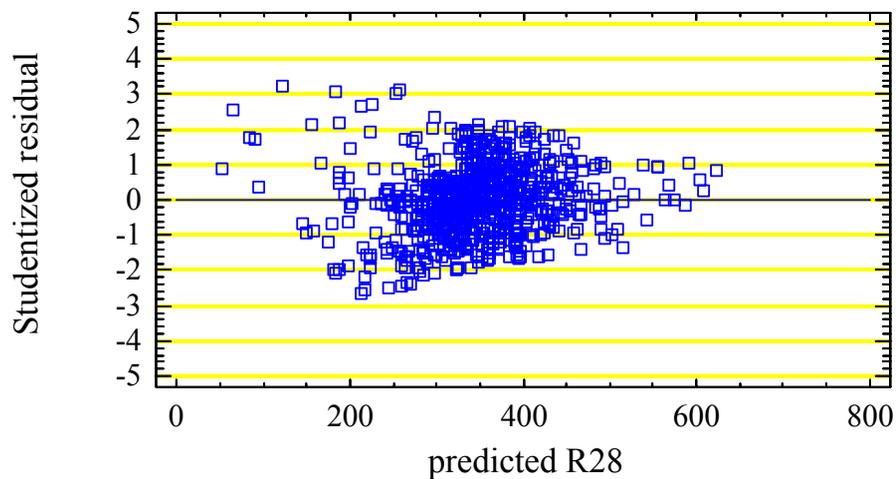
Gráfico 21.- Residual Plot



Al observar los residuos versus la variable R_7 en el gráfico 21, se siguen observando residuos mayores a 3, y al analizar esos datos se encuentra que no son outliers. Además se puede ver que no hay ningún patrón entre los puntos, lo que indicaría que el modelo es el adecuado.

El gráfico 22, es con respecto a los valores predcidos de R_{28} .

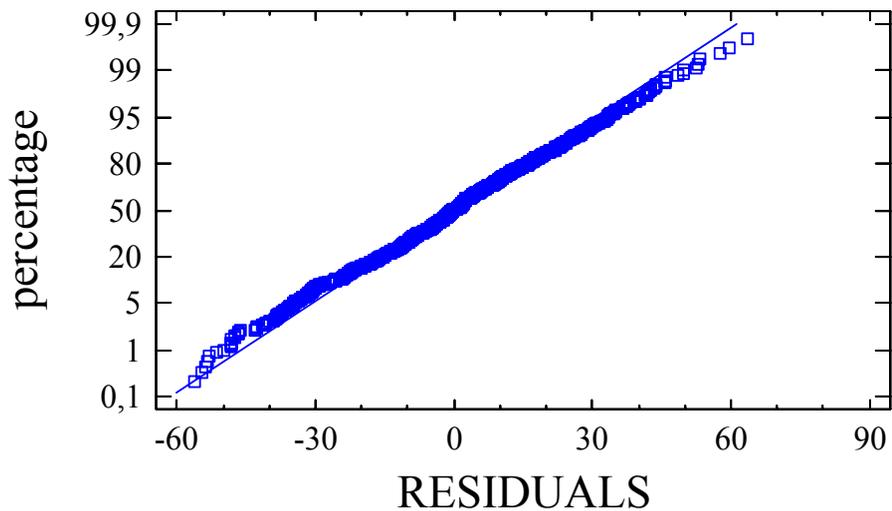
Gráfico 22.- Residual Plot



La importancia de este diagrama es visualizar la existencia de heteroscedasticidad, la cual no ocurre en este caso.

Para confirmar que el modelo es el correcto y que se satisfacen todos los supuestos, se verá la normalidad de los residuales en el gráfico 23.

Gráfico 23.- Normal Probability Plot



Se puede apreciar que los puntos se acercan a la línea, lo que indicaría que los residuos tendrían distribución normal, o por lo menos es aceptable su semejanza.

Finalmente la fórmula de predicción de los hormigones confeccionados con cementos alta resistencia en la Provincia de Valdivia, una vez comprobado todos los supuestos del análisis de regresión, es:

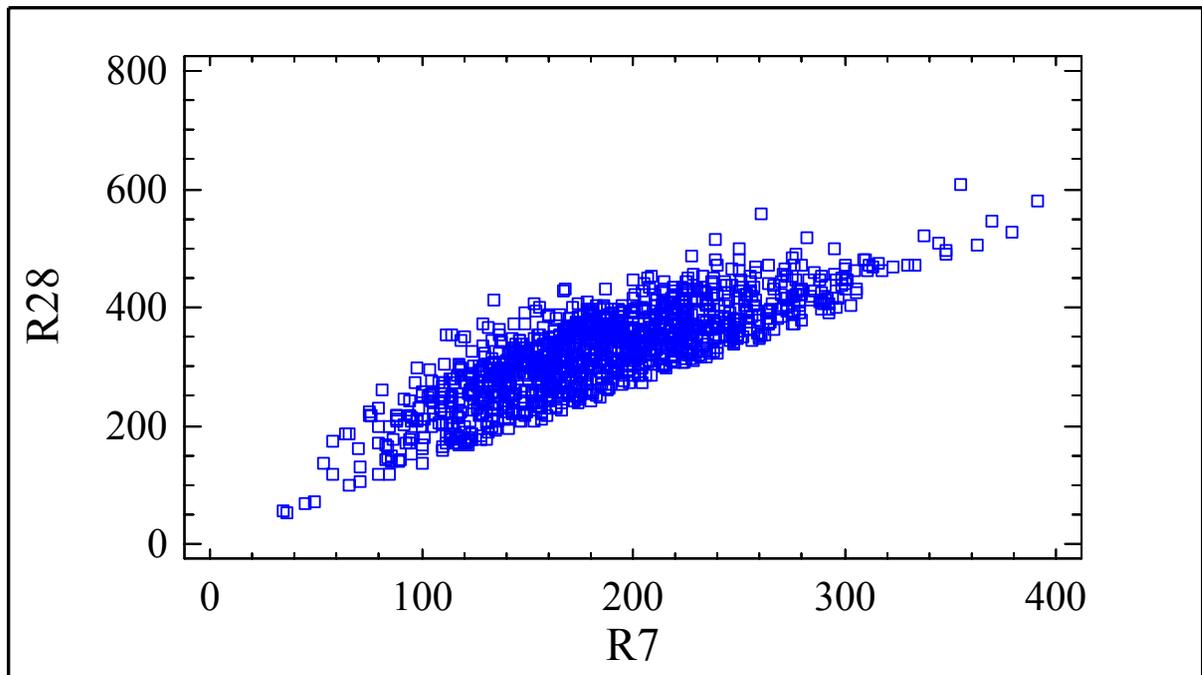
$$R_{28} = \frac{1}{(0,0000601703 + \frac{0,757119}{R_7})}$$

5.3. FORMULA DE PREDICCIÓN PARA HORMIGONES CONFECCIONADOS CON CEMENTOS CORRIENTES

El procedimiento a seguir será el mismo que para la fórmula anterior.

Para comenzar con el análisis, veamos el gráfico 24.

Gráfico 24.- Gráfico de Dispersión R_{28} v/s R_7 (Kg/cm^2)



Se pueden observar puntos con tendencia a separarse de la nube de puntos central del gráfico 24. Además esta nube no tiene una tendencia pareja ni regular.

Observemos por ejemplo la resistencia de 100 a los 7 días. El rango de resistencia a los 28 días de edad, varía aproximadamente de 140 a 260. Los valores menores a 100 a los 7 días corresponden a hormigones H30, hormigones que debieron haber logrado un valor aproximado de 204 a los 7 días.

Las irregularidades que quedan de manifiesto ya fueron extensamente descritas en la primera parte de este capítulo.

Si se aceptaran todos estos datos, el coeficiente de determinación (R^2) máximo que se lograría sería de un 70%, lo que no satisface el propósito de esta Memoria.

Se procedió entonces a analizar los datos, en donde se calculó los porcentajes logrados a los 7 días del valor especificado a los 28 días, y además del valor real logrado. Al hacer esto, se eliminaron todos los datos que tuvieran un valor menor a 55% del hormigón especificado a los 28 días. Estos valores llegaban casi a un 12 % del total de los datos.

Además se observó que existían hormigones que a los 7 días obtenían porcentajes menores al 50%, y aún así llegaban a la resistencia especificada y a veces con valores mayores a ésta.

Por ejemplo un H20 a los 7 días obtiene una resistencia de 76 kg/cm^2 lo que corresponde a un 38% de la resistencia especificada o, a un 35% de la resistencia lograda, resistencia que a los 28 días obtuvo 218 Kg/cm^2 .

Si el encargado de una obra, al ver que el hormigón controlado a los 7 días logra un 38% del total, seguramente tomará medidas para solucionar el problema que obviamente se viene encima, ya que la experiencia enseña que un hormigón con ese porcentaje no llegaría a su 100% a los 28 días.

Por otra parte, se espera que los hormigones confeccionados con cementos corrientes a los 3 días lleguen a un 40% del valor total. Y para cementos alta resistencia, se espera que lleguen aproximadamente al 48% del total.

No se pudo llegar a una respuesta que explicara estos sucesos fehacientemente, y las muestras en las que se observa este tipo de comportamiento corresponden al 43% del total de la base de datos. Se pueden especular varias razones para que los hormigones tengan este comportamiento, y entre esas posibilidades están los errores que se pueden cometer al ensayar las probetas.

Otra posibilidad sería que ya es tiempo de que se actualicen las curvas de resistencias, porque se podría pensar que ya no son representativas de todos los tipos de hormigones. A pesar que en la base de datos facilitada por un ingeniero del norte, los casos de este tipo eran mínimos, siendo menores al 3% del total de los datos.

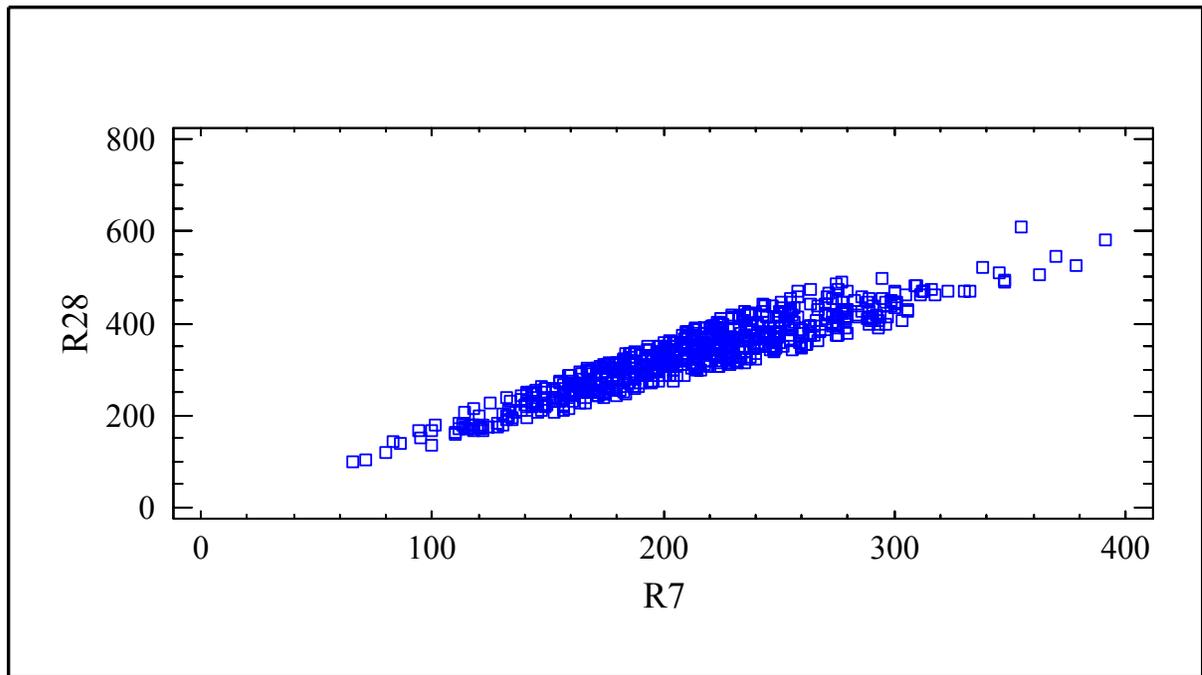
El uso de aditivos en Chile empezó en los años 70, de lo que se deduce que se han hecho muchos estudios sobre su aplicación.

Otra posibilidad es no que no haya error en los ensayos, que la curva de resistencias sigue siendo representativa, y estos hormigones, no sean de calidad y tengan consecuencias dañinas en las obras utilizadas.

Por estas razones y por la utilidad de la fórmula que se desea elaborar, estos hormigones se retiraron de la base de datos. La base datos quedó conformada por 645 muestras.

Los cambios realizados en la base de datos, generan un nuevo diagrama de dispersión como el que se observa en el gráfico 25.

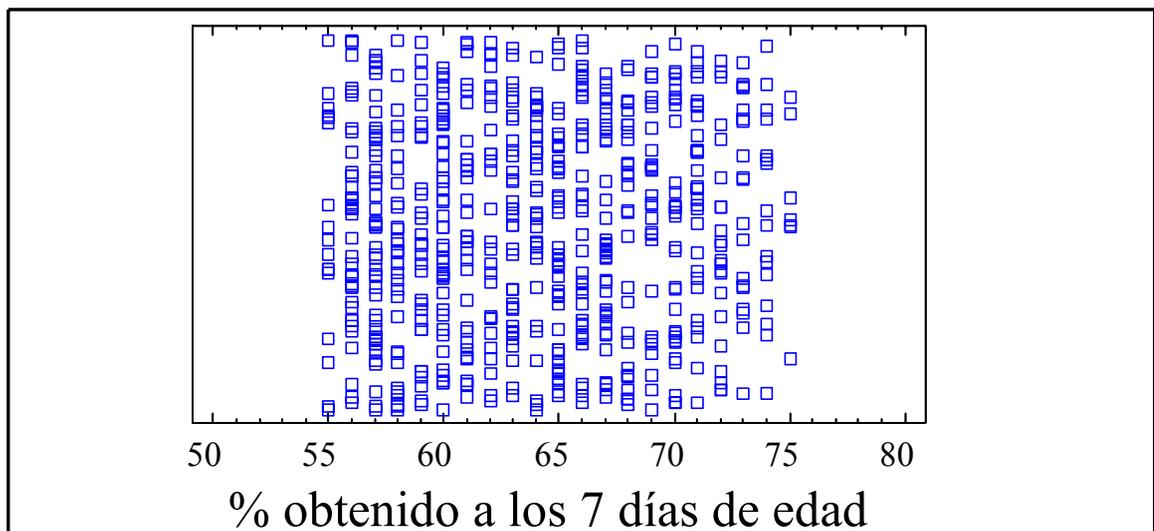
Gráfico 25.- Diagrama de Dispersión de R_{28} v/s R_7 (Kg/cm^2)



Como se puede observar la nube de puntos es bastante pareja y regular, con sectores menos poblados debido a poca cantidad de muestras en esas regiones, pero que claramente siguen la misma tendencia, además la nube se encuentra bastante agrupada.

Observemos el diagrama de dispersión de los porcentajes obtenidos a los 7 días de edad, en el gráfico 26:

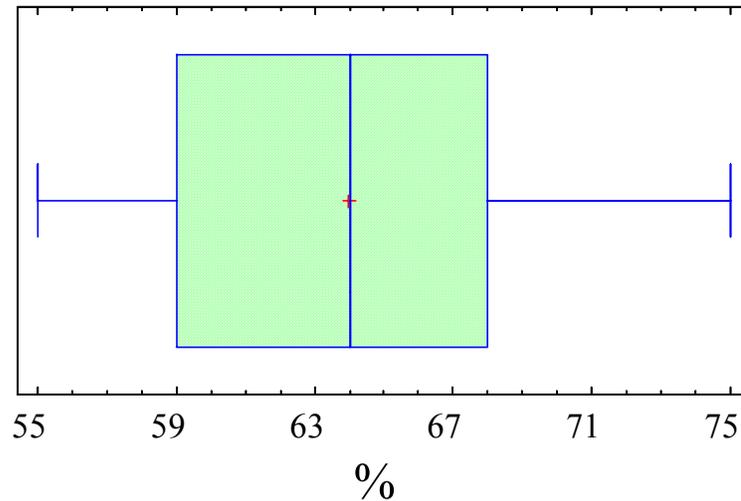
Gráfico 26.- Diagrama de Dispersión del Porcentaje Obtenido a los 7 días de edad



El rango de porcentajes de las muestras que componen este grupo, es bastante razonable.

Observemos el diagrama de Box en el gráfico 27:

Gráfico 27.- Box-and-Whisker Plot de los Porcentajes



Se puede apreciar que el valor de la mediana con la media es igual. Este valor es 64. Y por supuesto no hay valores atípicos.

5.3.1. Ajuste de la Curva

Veamos los resultados obtenidos por el programa estadístico seleccionado para este proceso:

REGRESIÓN SIMPLE - R_{28} vs. R_7

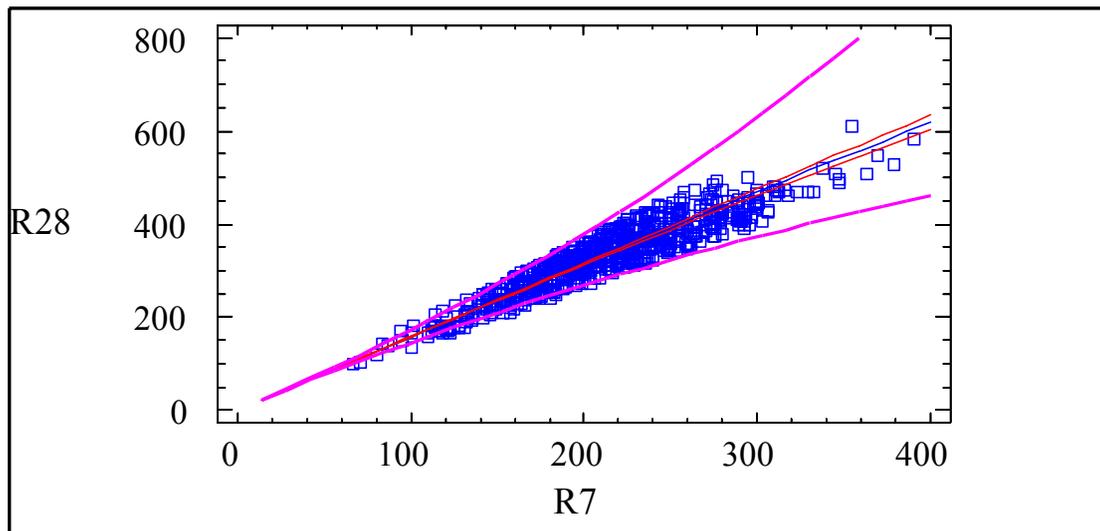
Comparación entre los Modelos Ajustados a los Datos

Modelos	Correlación	R^2 corregido
Modelo IV	0,9582	91,80%
Modelo VI	0,9465	89,59%
Modelo VII	0,9373	87,86%
Modelo VIII	-0,9369	87,77%
Modelo I	0,9331	87,08%
Modelo V	0,9320	86,86%
Modelo IX	0,9278	86,09%
Modelo II	0,9137	83,49%
Modelo III	-0,8846	78,26%

De los modelos ajustados, el modelo IV es el que logra el más alto valor de coeficiente de determinación R^2 corregido, con un valor de 91,7961%. Por lo tanto, esa será la fórmula de predicción.

Ahora se mostrará en el gráfico 28, como queda el modelo ajustado a los datos del grupo:

Gráfico 28.- Modelo IV Ajustado a los Datos



En el gráfico las líneas fucsias indican los límites de predicción del modelo para el 95% de nivel de confianza. Las líneas rojas muestran los límites de confianza.

El resultado entregado por el programa es el siguiente:

Regression Analysis - Double reciprocal model: $Y = 1/(a + b/X)$

Dependent variable: R28
Independent variable: R7

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	0,0000516933	0,0000386266	1,33828	0,1808
Slope	0,627137	0,00738734	84,8935	0,0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0,000559813	1	0,000559813	7206,91	0,0000
Residual	0,0000499464	643	7,76772E-8		
Total (Corr.)	0,000609759	644			

Correlation Coefficient = 0,958169
R-squared = 91,8088 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 91,7961 percent
Standard Error of Est. = 0,000278706
Mean absolute error = 0,0722834

Los resultados obtenidos del ajuste para el modelo seleccionado que describe la relación entre R_{28} y R_7 . Se expresa en la ecuación del modelo ajustado siguiente:

$$R_{28} = \frac{1}{(0.0000516933 + \frac{0.627137}{R_7})}$$

Como el P-Value en el análisis de la varianza es menor que 0.01, existe una relación estadísticamente significativa entre R_{28} y R_7 , con un nivel de confianza del 99%.

El R^2 corregido mide la bondad del ajuste del modelo, entonces el modelo se ajusta en un 91.80% a los datos.

El coeficiente de correlación es de 0.958169, lo que indica una fuerte relación entre las variables, además de ser una relación directamente proporcional.

El error estándar de los estimados muestra la desviación estándar de los residuos, este valor es 0.000278706.

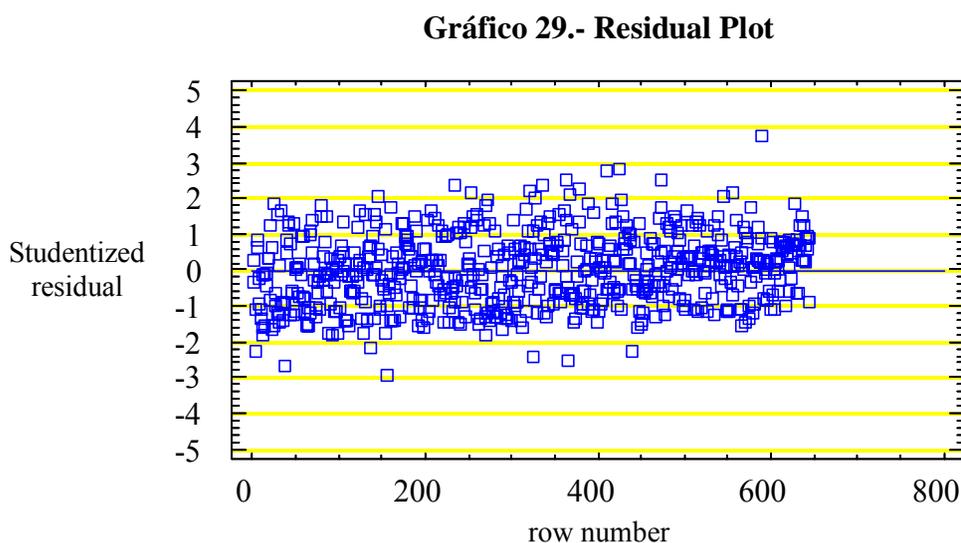
El MAE (Mean absolut Error) es de 0.000228601, que es el valor del promedio de los valores residuales.

El intercepto indica el nivel promedio de R_{28} cuando R_7 es igual a cero, en este caso es aproximadamente cero.

5.3.2. Análisis gráfico de los residuos

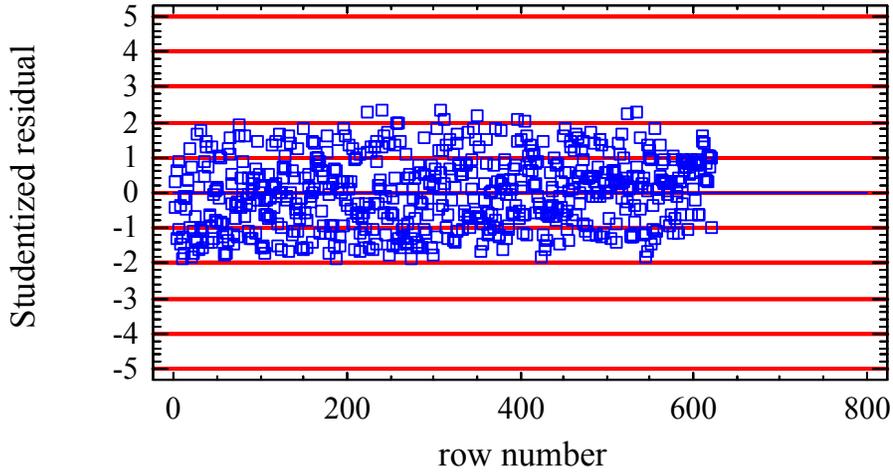
Como ya se vio en el caso anterior el análisis de los residuos es muy importante para ver si el modelo es correcto y si se satisfacen con todos los supuestos explicados en el capítulo III.

En el gráfico 29 se buscarán los residuos que puedan indicar la presencia de outliers.



Revisando los puntos que eran posibles outliers, se eliminaron todos aquellos que sí lo eran, generando un nuevo gráfico de residuos (véase gráfico 30):

Gráfico 30.- Residual Plot



Como se ve quedan algunos datos que corresponden a residuos inusuales, que tienen una desviación de dos veces la desviación estándar.

Veamos los resultados entregados por el programa estadístico empleado, con los nuevos cambios producidos al retirar estos valores:

Regression Analysis - Double reciprocal model: $Y = 1/(a + b/X)$

Dependent variable: R28
Independent variable: R7

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Intercept	0,0000131891	0,0000375181	0,35154	0,7252
Slope	0,635412	0,0073447	86,5129	0,0000

Analysis of Variance

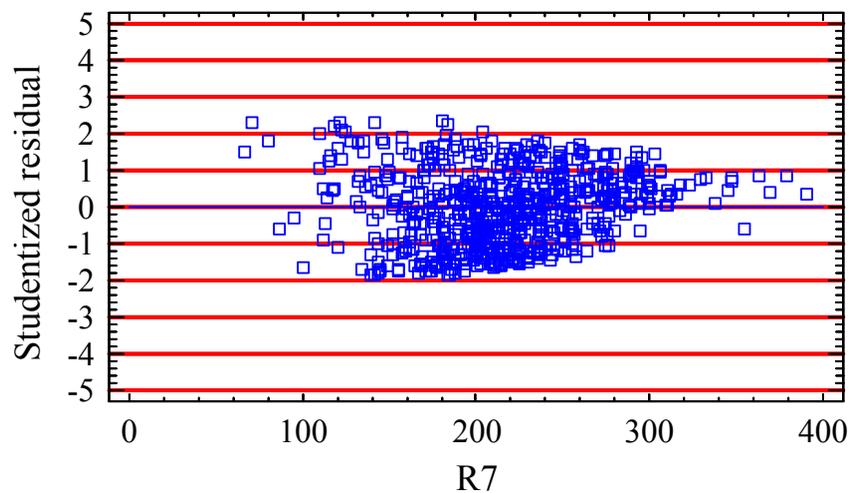
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0,000483762	1	0,000483762	7484,49	0,0000
Residual	0,0000400093	619	6,46353E-8		
Total (Corr.)	0,000523772	620			

Correlation Coefficient = 0,961048
R-squared = 92,3613 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 92,349 percent
Standard Error of Est. = 0,000254235
Mean absolute error = 0,000213943

Lo que se puede observar es que al eliminar esos datos se produjo un aumento del R^2 corregido, siendo ahora la bondad de ajuste de un 92.35% %. Además el total de las muestras que quedaron en este grupo es de 621.

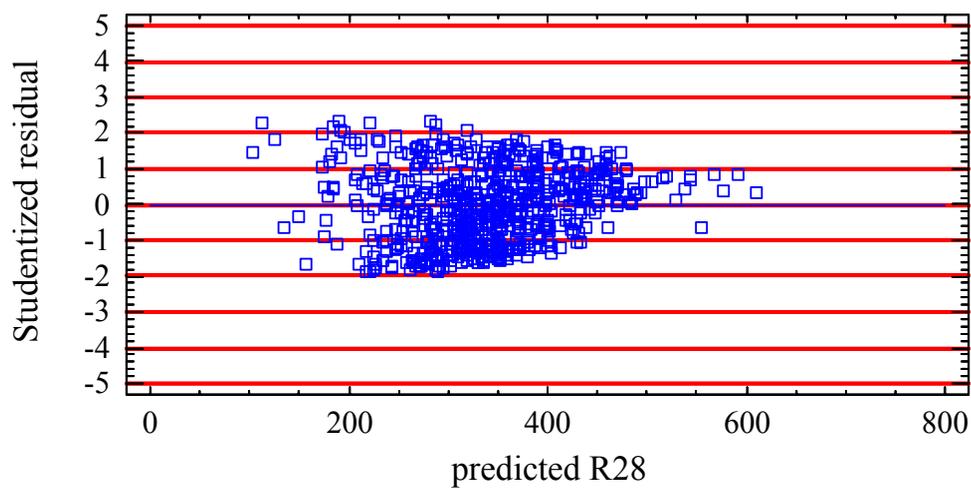
Se continua con el análisis de los residuos en los gráficos 31 y 32.

Gráfico 31.- Residual Plot



Al observar los residuos v/s la variable R_7 en el gráfico 31, se comprueba que el modelo es correcto al no ver ninguna tendencia entre los puntos, es decir, no hay un patrón entre ellos.

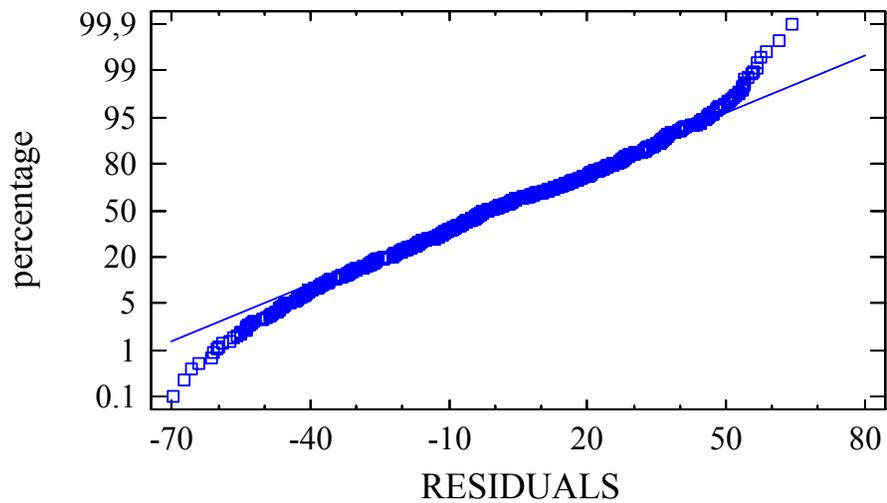
Gráfico 32.- Residual Plot



No se visualiza la existencia heteroscedasticidad o dispersión desigual en el gráfico 32, lo que confirma el hecho de que el modelo es correcto.

Por último queda comprobar el supuesto de que los residuos tienen una distribución normal, o que sea razonablemente aceptable en su semejanza, lo que se observa en el gráfico 33.

Gráfico 33.- Normal Probability Plot



Se puede ver la tendencia de los puntos a seguir la línea referencia, pero en los extremos se tiende a curvar. Esto puede ser producido por el apuntamiento o curtosis de los datos, pero como en la mayoría de los datos se ve la tendencia a seguir sobre la línea que indica la normalidad, se podría aceptar la normalidad de los residuos.

Finalmente la fórmula estimada para la predicción de los hormigones confeccionados con cementos corrientes en la Provincia de Valdivia, es:

$$R_{28} = \frac{1}{\left(0.0000131891 + \frac{0.635412}{R_7}\right)}$$

5.4. RESUMEN

Como los interceptos son aproximadamente cero, las fórmulas se simplificaron, quedando más fáciles de aplicar. Finalmente, se obtuvo:

Fórmulas de predicción de los hormigones confeccionados en la Provincia de Valdivia

1. Hormigones confeccionados con cementos alta resistencia:

$$R_{28} = \frac{R_7}{0.757119}$$

2. Hormigones confeccionados con cementos corrientes:

$$R_{28} = \frac{R_7}{0.635412}$$

5.5. COMPARACIÓN DE LOS VALORES OBSERVADOS V/S LOS VALORES PREDECIDOS POR LAS FÓRMULAS

Veamos en forma general el comportamiento de las fórmulas, se comparará la variable observada (resistencia a los 28 días de edad), con la variable predecida, la que se obtiene al aplicar la fórmula con los valores de la resistencia a los 7 días.

5.5.1. Hormigones confeccionados con cementos alta resistencia

Comparemos las medidas resumen de las variables. R28 es la variable observada y Predicted es la variable obtenida al aplicar la fórmula.

El resultado entregado por el programa estadístico es el siguiente:

Two-Sample Comparison - PREDICTED & R28

Summary Statistics

	PREDICTED	R28
Count	731	731
Average	345,761	345,672
Median	345,325	342,0
Mode		339,0
Geometric mean	336,606	336,618
Variance	5490,75	5420,4
Standard deviation	74,0996	73,6234
Minimum	51,3519	51,0
Maximum	622,932	595,0
Range	571,58	544,0
Lower quartile	304,697	308,0
Upper quartile	384,492	384,0
Interquartile range	79,795	76,0
Skewness	0,00416687	0,019134
Kurtosis	1,91328	1,91988

En cuanto a las medidas resumen de la estadística se podría decir que son muy similares, veamos el histograma de frecuencias en el gráfico 34 y el diagrama de Box en el gráfico 35.

Gráfico 34.- Histograma de comparación.

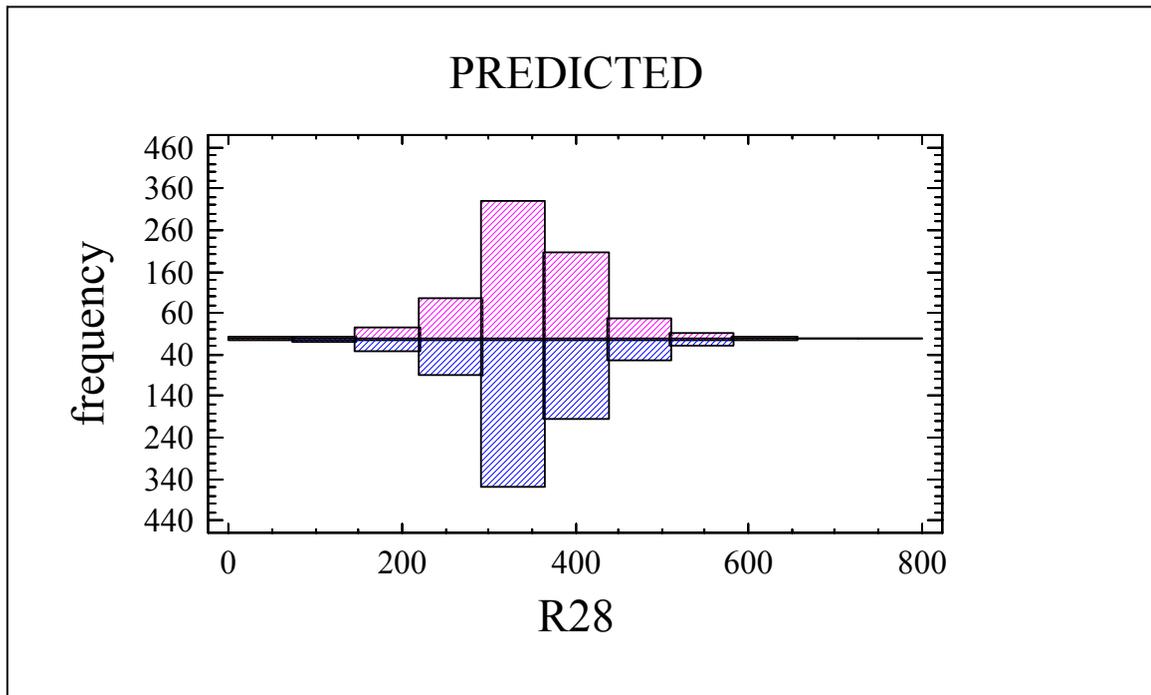
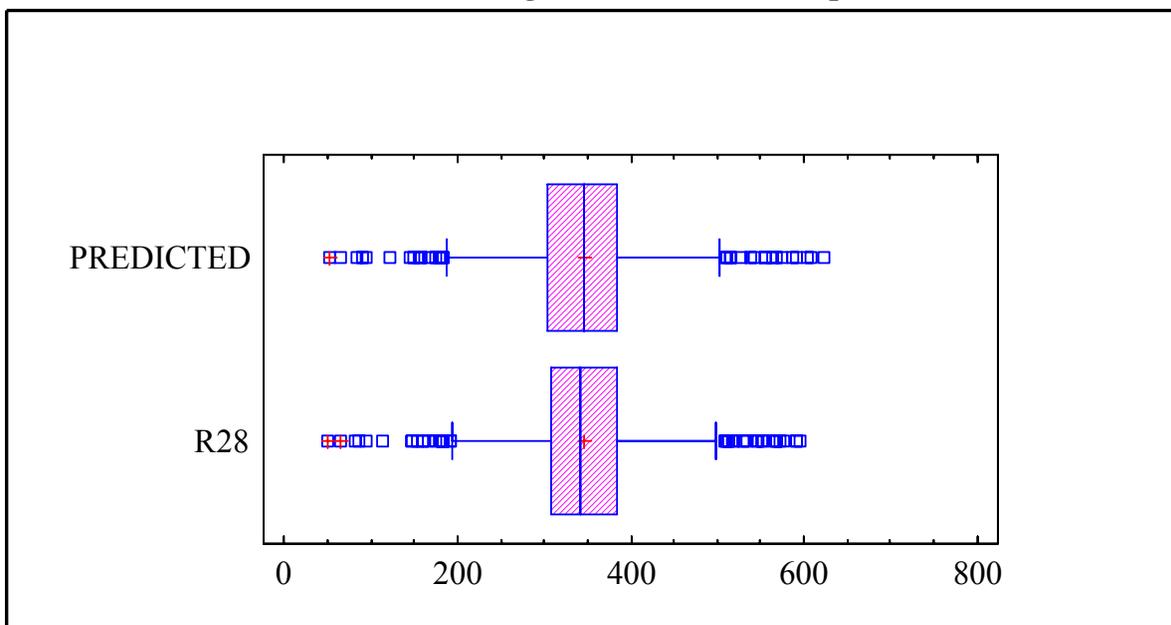


Gráfico 35.- Diagramas de Box de comparación.



No se pueden apreciar diferencias importantes.

Veamos si existe una diferencia estadística significativa entre la media de ambas variables, para esto se usó el programa estadístico entregando el siguiente resultado:

Multiple Range Tests

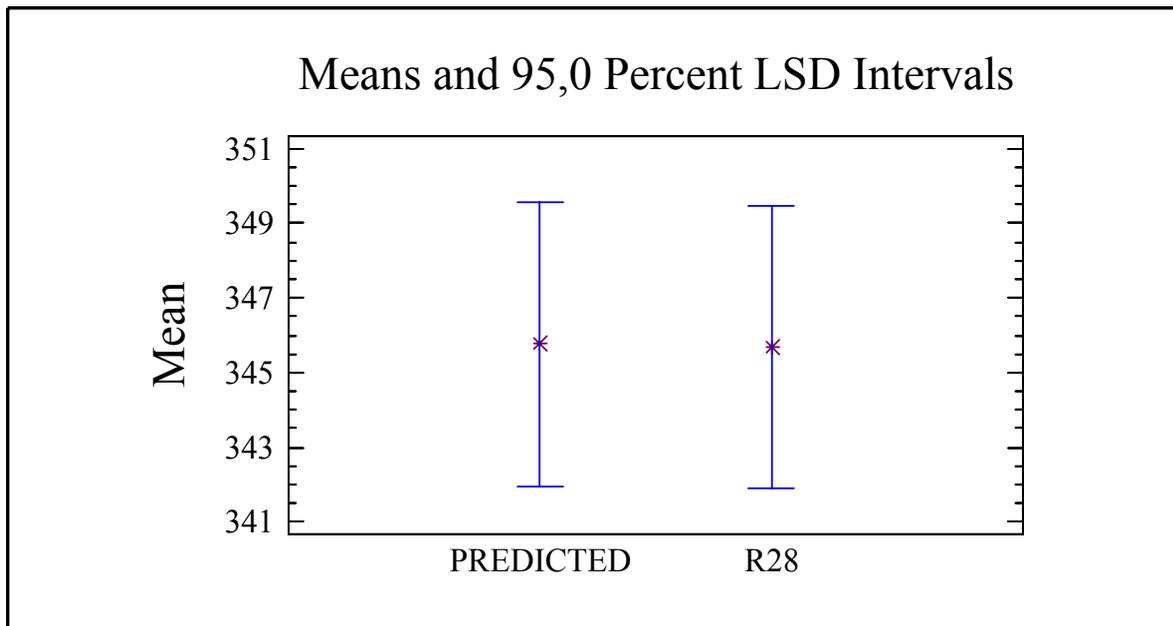
Method: 95,0 percent LSD

	Count	Mean	Homogeneous Groups
R28	731	345,672	X
PREDICTED	731	345,761	X

Contrast	Difference	+/- Limits
PREDICTED - R28	0,089274	7,57226

Al observar la diferencia de 0,089274, se puede decir que no existe una diferencia estadística significativa, con un nivel de confianza de 95%. Esta pequeña diferencia se puede apreciar en el gráfico 36.

Gráfico 36.- Diferencia en la media de la variable observada y la predecida por fórmula elaborada para hormigones confeccionados con cementos de alta resistencia.



Veamos si existe una diferencia estadística significativa entre la varianza de ambas variables, para esto se usó el programa estadístico entregando el siguiente output:

Variance Check

Cochran's C test: 0,503224 P-Value = 0,86176
 Bartlett's test: 1,00002 P-Value = 0,86176
 Hartley's test: 1,01298
 Levene's test: 0,0959339 P-Value = 0,756761

En este test la hipótesis nula es que la desviación estándar entre las dos variables es la misma. Como el menor de los P-Value es mayor que 0,05, no existe una diferencia estadística significativa entre las desviaciones estándar de las variables analizadas, con un 95% de nivel de confianza.

Ahora se analizará el comportamiento de la fórmula, se acepta que los resultados de los valores predecidos sean en su mayoría subestimados, más que sobrestimados, por razones lógicas al diseño con hormigones. Ya que siempre es mejor un resultado que subestime, para poder tener precaución a la hora de tomar decisiones. En la tabla 6 se resumirá esta información.

Tabla 6.-Estimación de la fórmula de predicción para los hormigones confeccionados con cementos alta resistencia.

Estimación del comportamiento del Error	n° < 5%	5% < n° < 10%	10% < n° < 15%	TOTAL
Muestras subestimadas	208	128	27	363
% Subestimación	48,48%	55,65%	37,50%	49,66%
Muestras sobrestimadas	221	102	45	368
% Sobrestimación	51,52%	44,35%	62,50%	50,34%
TOTAL	429	230	72	731

Como se puede apreciar el comportamiento es muy parejo, por lo que la fórmula es muy buena. Además se puede observar que los valores sobrestimados o subestimados no pasan del 15% de error, lo que es bastante tolerable.

5.5.2. Hormigones confeccionados con cementos corrientes

Al igual que con la otra fórmula se comparan las medidas resumen de las variables.

R_{28} es la variable observada de la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y

Predicted es la variable obtenida al aplicar la fórmula de predicción.

El resultado entregado por el programa estadístico es el siguiente:

Two-Sample Comparison - PREDICTED & R28

Summary Statistics

	PREDICTED	R28
Count	621	621
Average	338,654	338,979
Median	336,86	344,0
Mode		
Geometric mean	329,244	329,631
Variance	5988,85	5703,2
Standard deviation	77,3876	75,5195
Minimum	103,728	100,0
Maximum	610,395	608,0
Range	506,667	508,0
Lower quartile	288,474	294,0
Upper quartile	388,299	391,0
Interquartile range	99,825	97,0
Skewness	0,125938	-0,161392
Kurtosis	0,385619	0,278913

Se puede apreciar que son muy similares, sin grandes diferencias.

Para poder observar la comparación de mejor manera entre las variables revisemos los gráficos 37 y 38.

Gráfico 37.- Histogramas de comparación.

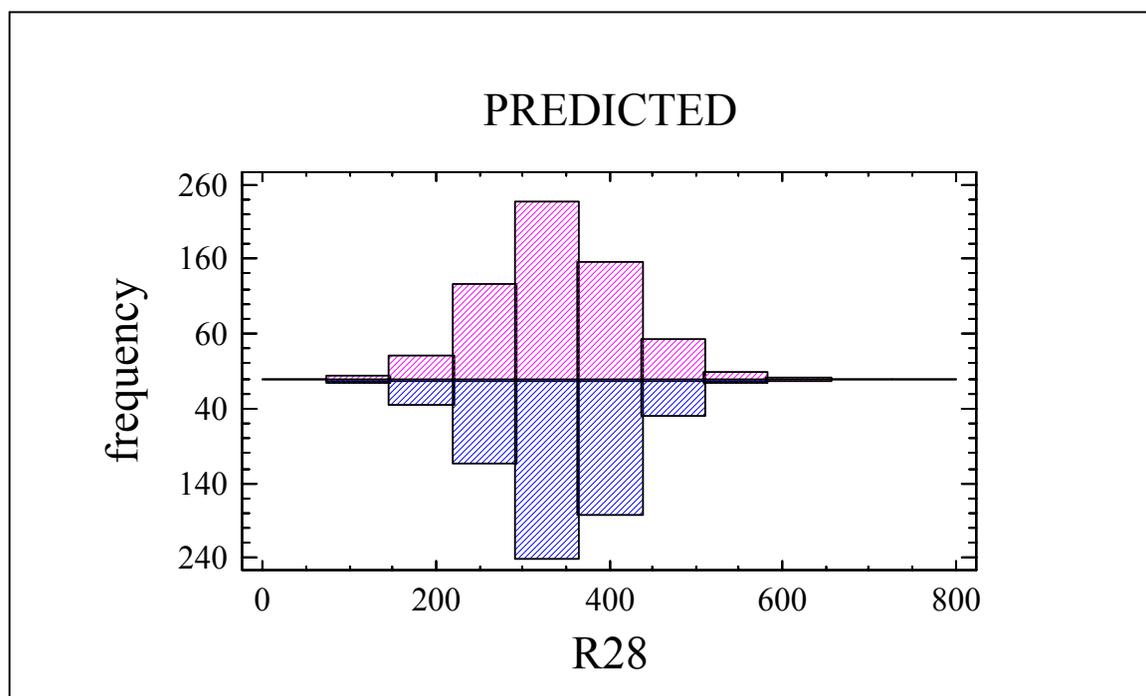
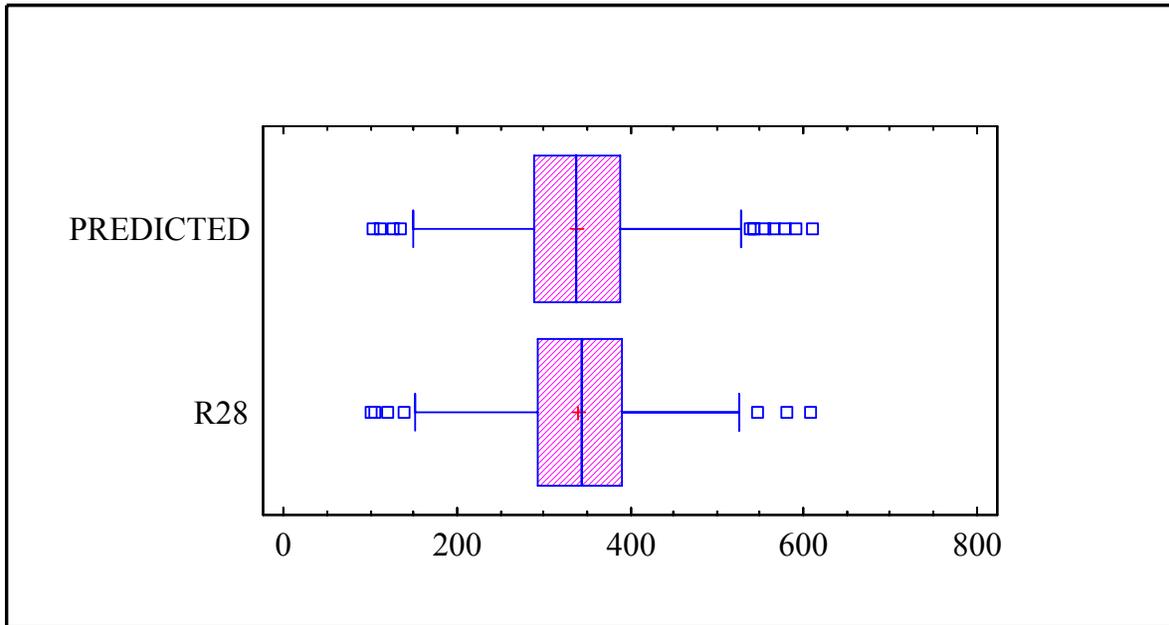


Gráfico 38.- Diagramas de Box de comparación.



Veamos si existe una diferencia estadística significativa entre la media de ambas variables, para esto se usó el programa estadístico entregando el siguiente resultado:

Multiple-Sample Comparison

Multiple Range Tests

Method: 95,0 percent LSD

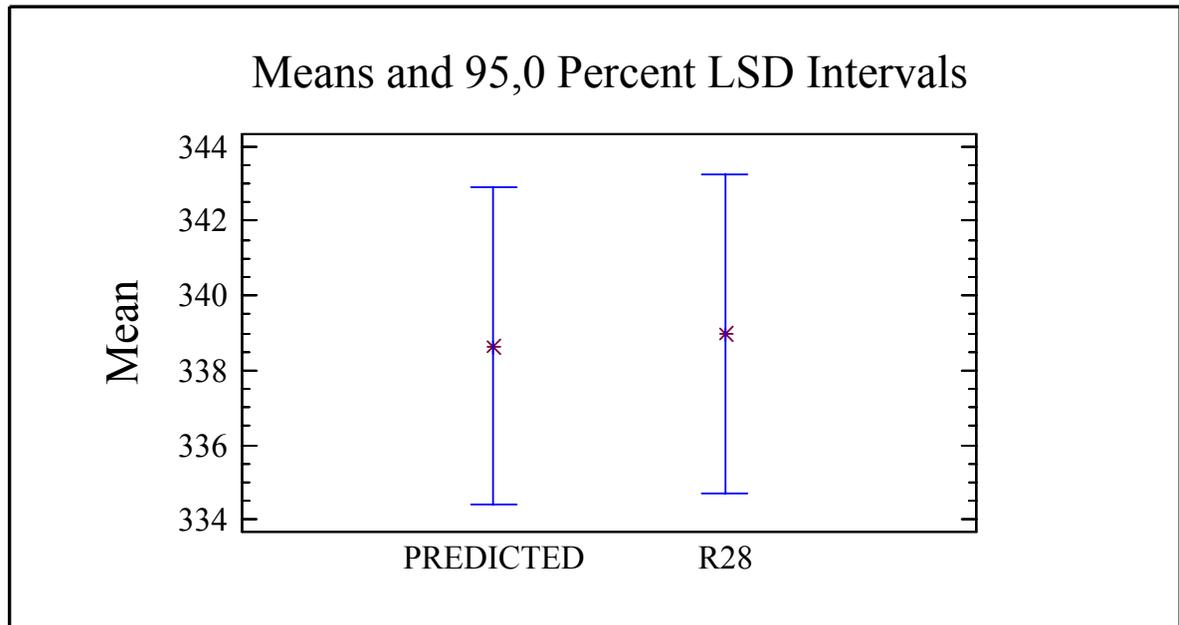
	Count	Mean	Homogeneous Groups
PREDICTED	621	338,654	X
R28	621	338,979	X

Contrast	Difference	+/- Limits
PREDICTED - R28	-0,32458	8,50449

La diferencia de $-0,32458$ indica que no existe una diferencia estadística significativa entre la media de las variables comparadas, con un nivel de confianza de 95%.

En el gráfico 6 se puede apreciar esta mínima diferencia.

Gráfico 39.- Diferencia en la media de la variable observada y la predecida por fórmula elaborada para hormigones confeccionados con cementos corrientes.



Veamos si existe una diferencia estadística significativa entre la varianza de ambas variables, para esto se usó el programa estadístico entregando el siguiente output:

Variance Check

Cochran's C test: 0,512215 P-Value = 0,543075
 Bartlett's test: 1,0003 P-Value = 0,543075
 Hartley's test: 1,05009
 Levene's test: 0,291052 P-Value = 0,589544

En este test la hipótesis nula es que la desviación estándar entre las dos variables es la misma. Como el menor de los P-value es mayor que 0.05, no existe una diferencia estadística significativa entre la desviación estándar de las variables, con un 95% de nivel de confianza.

Ahora se analizará el comportamiento de la fórmula en cuanto a su capacidad de estimar. Según los valores sobreestimados y subestimados se podrá tener una mayor confianza para la aplicación en la predicción de la resistencia de los hormigones. Esta información se resume en la tabla 7.

Tabla 7.-Estimación de la fórmula de predicción para los hormigones confeccionados con cementos corrientes.

Estimación del comportamiento del Error	n° < 5%	5% < n° < 10%	10% < n° < 15%	15% < n° < 20%	TOTAL
Muestras subestimadas	104	111	87	-	302
% Subestimación	44,26%	53,88%	54,04%	-	48,63
Muestras sobrestimadas	131	95	74	19	319
% Sobrestimación	55,74%	46,12%	45,96%	100%	51,37
TOTAL	235	206	161	19	621

Como se puede observar en los intervalos con mayor porcentaje los valores fueron en mayor cantidad subestimados, con la excepción del intervalo entre el 15% - 20%, en donde sólo 3,06% del total de muestras pertenece a ese intervalo.

El máximo valor de porcentaje de sobrestimación es menor a un 20%, en realidad corresponde a un 17%.

Se puede decir entonces, que esta fórmula también es muy aceptable y que los rangos de sobrestimación y subestimación son bastante parejos, y en porcentajes tolerables.

CAPITULO VI FORMULAS DE PREDICCIÓN MÁS USADAS EN CHILE

Ya se ha hablado de la importancia del control de los hormigones en la construcción, para lo cual se sacan las muestras y se ensayan generalmente a los 7 y a los 28 días de edad. El ensayo a una edad más temprana que a los 28 días, tiene por objeto la proyección de la resistencia a la edad que se realiza, para verificar si el hormigón controlado cumplirá o no con la resistencia especificada cuando éste tenga una edad de 28 días.

Para llevar a cabo la proyección desde la temprana edad de 7 a los 28 días, existen diversas fórmulas o propuestas entregadas por investigadores, siendo las más comunes, las realizadas en el extranjero.

En el presente capítulo se presentarán dos fórmulas de predicción, éstas fueron seleccionadas por distintas razones, la primera fórmula se seleccionó por ser la más usada en Chile, en especial por la Dirección Nacional de Vialidad, y la segunda por ser la primera, o de la que al menos se tenga registro, fórmula elaborada con hormigones confeccionados en Chile. Además, para conocer el comportamiento de estas fórmulas con los hormigones confeccionados en la Provincia de Valdivia, se procedió a contrastar las formulaciones seleccionadas con las muestras que conforman la base de datos.

6.1. FÓRMULA DE ROS

El *Compendio del Manual del Hormigón*, del Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, recomienda dos fórmulas de predicción de la resistencia a distintas edades de los 28 días. Siendo la más usada en Chile, por los laboratorios de control de calidad, la fórmula de Ros.

En 1928, el profesor Mirko Ros, realizó experiencias con hormigones de cemento portland conservados en el clima de cámara húmeda⁽¹⁾. El profesor Ros logró confeccionar una curva de resistencia en función del tiempo con sólo 18 ensayos de compresión, utilizando probetas cúbicas de 200 mm de arista.

La fórmula de Ros es válida para hormigones fabricados con cementos portland comerciales y de alta resistencia.

Él estableció una fórmula general:

$$R_{28} = K \cdot R_T$$

siendo:

R_{28} : Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días para probetas cúbicas de 200 mm de arista, en Kgf/cm²,

⁽¹⁾ INSTITUTO Chileno del Cemento. Tecnología del Hormigón. En: Seminario de Tecnología del Hormigón en Pavimentos de Calles. Santiago, 1974. 104 p.

K : Constante de Ros,

R_T: Resistencia a la compresión del hormigón, a la edad del ensayo, para probetas cúbicas 200 mm de arista, en Kg/cm².

La constante de Ros (K), se calcula por la siguiente expresión:

$$K = \frac{a + T^{\frac{2}{3}}}{b \cdot T^{\frac{2}{3}}}$$

donde :

T : Edad del hormigón, en días al ser ensayado,

a y b : Constantes que dependen de la plasticidad. Como se puede apreciar en la tabla 8.

Tabla 8.- Valores de las constantes a y b, según su plasticidad.

Consistencia	a	b
Muy plástica	4,61	1,5
Poco plástica	3,69	1,4

Fuente: Manual de Conocimientos Básicos para Inspectores de Obras de Pavimentación, MOP, 1980.

La consistencia o plasticidad del hormigón se mide a través del ensayo del Cono de Abrams. Como no existe claridad suficiente en cuanto a cuál es el descenso de cono recomendado como para determinar el límite de plasticidad (hormigones muy plásticos y poco plásticos), para la aplicación de la fórmula de Ros, se llegó a un acuerdo* de que el límite de plasticidad sería de 12,5 cm, basándose esta decisión en una publicación Argentina⁽²⁾, sobre los valores de fluidez con aditivos, los que se pueden apreciar en tabla 9.

Tabla 9.- Clasificación de las consistencias de los asientos medidos según el cono de Abrams.

Consistencias	Asiento (cm)	Discrepancias que acepta Norma IRAM 1666
Dura (D)	5	± 1,5
Plástica (P)	10	± 2,5
Blanda (B)	15	± 3,0
Fluida (F)	+ de 15	± 3,5*

Fuente: Manual de Uso del Hormigón Elaborado. Argentina, 2005.

* Únicamente usando un aditivo superfluidificante.

* El acuerdo se tomó en conversaciones con profesionales del área de tecnología del hormigón.

⁽²⁾ ASOCIACION Argentina del Hormigón Elaborado. Manual del Uso del Hormigón Elaborado[en línea].

Argentina.[fecha de consulta: 12 Febrero 2005]. Disponible en: <http://www.hormigonelaborado.com/manual-7.htm>.

Entonces para las muestras con cono menor a 12,5 cm, se les define como muy plásticas y para las muestras con cono mayores a 12,5 cm, se les define como poco plásticas.

6.1.1. Contrastación con base de datos de la fórmula de Ros.

Veamos como se comporta la fórmula de Ros, con las muestras que componen la base de datos. La fórmula de Ros es para cementos portland y portland de alta resistencia, en estado puro, como los usan en Estados Unidos y países europeos, y no portland con adiciones como las puzolanas o escorias de alto horno, que son el tipo de cementos utilizados en Chile. A pesar de esto, es preciso señalar, que en Chile se aplica a todo tipo de calidades de hormigón, no importando si se trata de un hormigón corriente, de esta forma la propuesta de Ros, es aplicable a todo el universo de muestras que posee la base de datos.

El procedimiento es bastante sencillo, en una planilla electrónica se calculan los nuevos valores predecidos para la resistencia a la compresión a los 28 días de edad.

A la variable obtenida experimentalmente se le llamo: Observado R28

A la variable obtenida de la aplicación de la fórmula se le llamo: Ros R28

Ingresando estas variables al programa estadístico para su comparación, se obtuvieron los siguientes resultados:

Two-Sample Comparison - Ros R28 & Observado R28

Summary Statistics

	Ros R28	Observado R28
Count	1352	1352
Average	367,111	342,598
Median	366,088	342,0
Mode	375,127	333,0
Geometric mean	355,048	333,39
Variance	8117,32	5557,3
Standard deviation	90,0961	74,5473
Minimum	58,755	51,0
Maximum	702,936	608,0
Range	644,181	557,0
Lower quartile	307,333	303,0
Upper quartile	421,83	387,5
Interquartile range	114,497	84,5
Skewness	0,161632	-0,0703253
Kurtosis	0,753721	1,13141

Se puede observar como resultado del programa estadístico, que hay algunas notorias diferencias, principalmente en la media, desviación estándar y en la varianza.

Observemos mejor esta comparación a través de los gráficos 40 y 41.

Gráfico 40.- Histogramas de comparación.

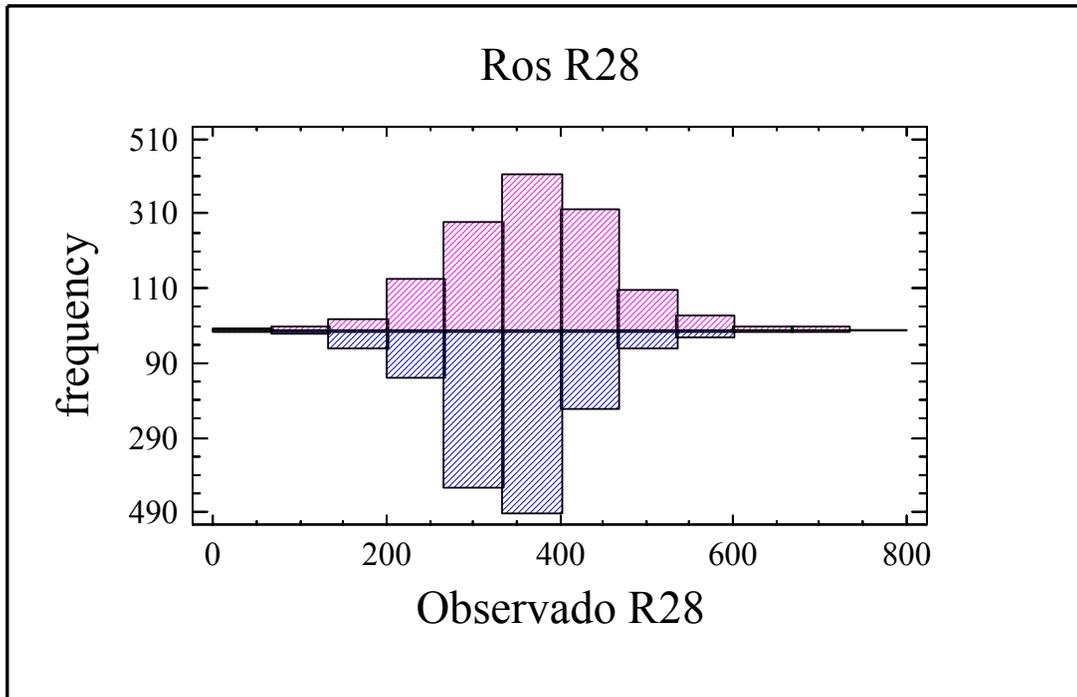
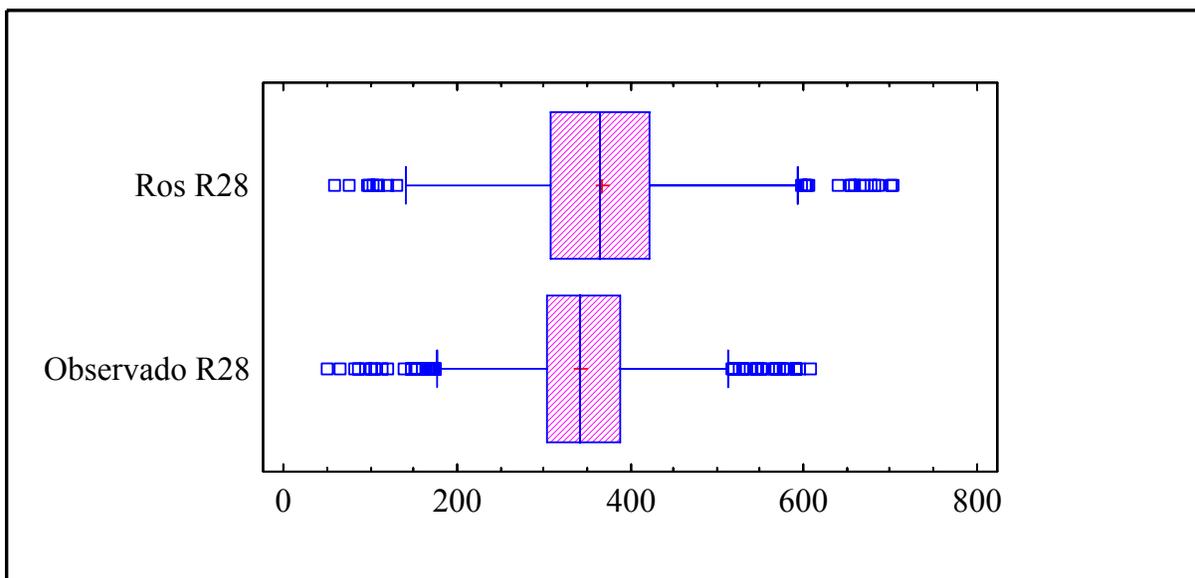


Gráfico 41.- Diagramas de Box de comparación.



Al observar estos gráficos, queda mucho más clara las diferencias entre las variables. Además en el último gráfico se puede observar una tendencia de la fórmula de Ros a sobrestimar los datos. Lo que se comprobará más adelante.

Veamos si existe una diferencia estadística significativa entre la media de ambas variables, para esto se usó el programa estadístico entregando el siguiente resultado:

Multiple Range Tests

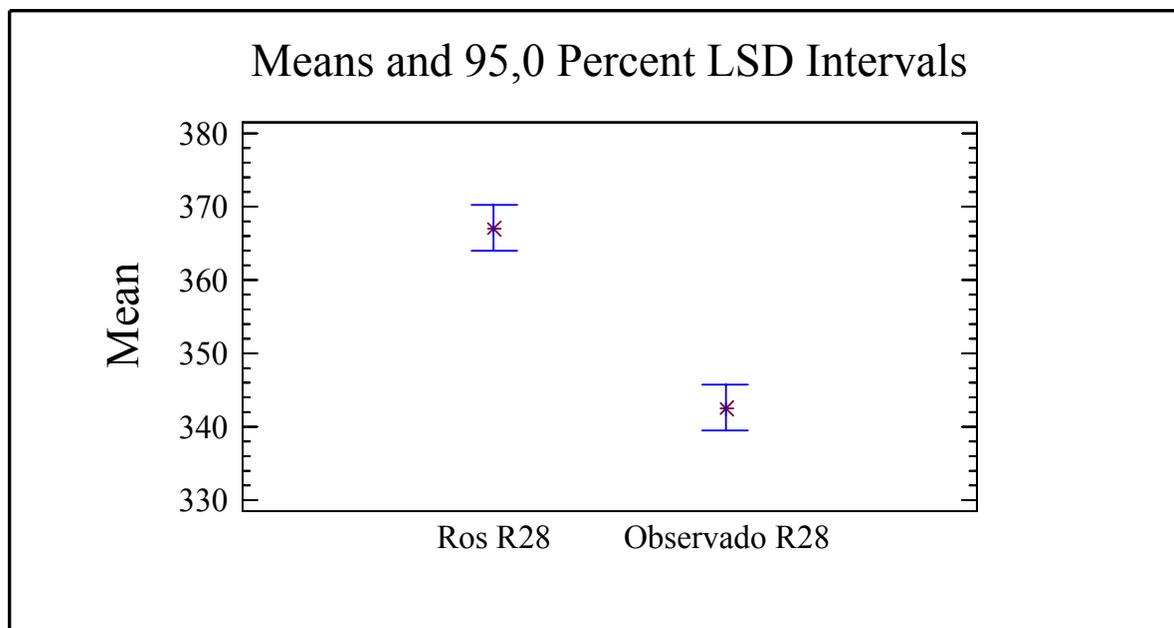
```

-----
Method: 95,0 percent LSD
Count      Mean      Homogeneous Groups
-----
Observado R28  1352    342,598    X
Ros R28       1352    367,111    X
-----
Contrast      Difference      +/- Limits
-----
Ros R28 - Observado R28      *24,5134      6,2333
-----
* denotes a statistically significant difference.

```

El resultado muestra que existe una diferencia estadística significativa al observar la diferencia de 24,5134, con un nivel de confianza de 95%. Esta diferencia se puede apreciar en el gráfico 42.

Gráfico 42.- Diferencia en la media de la variable observada y la predecida por fórmula de Ros.



Veamos si existe una diferencia estadística significativa entre la varianza de ambas variables, para esto se usó el programa estadístico entregando el siguiente resultado:

Variance Check

Cochran's C test: 0,593604 P-Value = 3,89977E-12
 Bartlett's test: 1,018 P-Value = 3,88722E-12
 Hartley's test: 1,46066
 Levene's test: 47,2425 P-Value = 6,31051E-12

En este test la hipótesis nula es que la desviación estándar entre las dos variables es la misma.

Como el menor de los P-value es menos que 0.05, existe una diferencia estadística significativa entre la desviación estándar de las variables, con un 95% de nivel de confianza.

Ahora se analizará el comportamiento de la fórmula, se acepta que valores predecidos sean en su mayoría subestimados, más que sobrestimados, por razones lógicas al diseño con hormigones. Ya que es mejor obtener un resultado que subestime la resistencia final, para poder tener precaución a la hora de tomar decisiones. En la tabla 10 se resumirá esta información.

Tabla 10.-Estimación de la Fórmula de Ros

Estimación del comportamiento del Error	n° < 5%	5% < n° < 10%	10% < n° < 15%	15% < n° < 20%	20% < n° < 35%	TOTAL
Muestras subestimadas	137	118	117	42	-	414
% Subestimación	51,50%	37,34%	39,13%	16,54%	-	30,62%
Muestras sobrestimadas	129	198	182	212	217	938
% Sobrestimación	48,50%	62,66%	60,87%	83,46%	100%	69,38%
TOTAL	266	316	299	254	217	1352

Como era lógico de esperar la tendencia a sobrestimar es alta, ya que existen muchas razones por la cual esta fórmula no sería representativa de los hormigones confeccionados en Chile, entre las cuales se pueden mencionar:

- En la época que esta fórmula fue elaborada no existía la producción ni comercialización de aditivos, producto que se utiliza en la mayoría de las mezclas de hormigón confeccionados en Chile.
- La poca cantidad de muestras utilizadas en su elaboración, sólo trabajó con 18 probetas ensayadas a la compresión, lo que en estos tiempos significa una baja representatividad para el universo de obras, así como la diversidad de tipos y calidades de hormigones utilizados hoy en día.

6.2. FÓRMULA DE MOISÉS PIÑEIRO⁽³⁾

Moisés Piñeiro, es un Ingeniero Civil, investigador del Instituto de Investigaciones y Ensayes de Materiales (IDIEM), de la Universidad de Chile. Él estableció en 1963, con su estudio “*Relación entre las resistencias a compresión de hormigones a 7 y a 28 días*”, las siguientes fórmulas, que se expresan en la tabla 11:

Tabla 11.- Fórmulas propuestas por Moisés Piñeiro.

Cemento Melón tipo A	$R_{28} = 3.133 \cdot R_7^{0.853} \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}$
Cemento Melón Extra	$R_{28} = 3.890 \cdot R_7^{0.804} \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}$
Cemento Polpaico Especial	$R_{28} = 3.119 \cdot R_7^{0.856} \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}$
Cemento Polpaico Especial 400	$R_{28} = 4,446 \cdot R_7^{0.789} \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}$

Donde.

R_7 : Resistencia a la compresión a los 7 días de edad, medida en probetas cúbicas de 20 cm de arista, en kgf/cm².

R_{28} : Resistencia a la compresión a los 28 días de edad, en kgf/cm².

Para Piñeiro, las expresiones deducidas para los casos particulares sólo deben utilizarse cuando se mantienen los factores que se fijaron al obtener los datos, en este caso: tipo de cemento y condiciones de curado, y condiciones de ensayo.

6.2.1. Contrastación de la base de datos con la fórmula de Moisés Piñeiro

Las propuestas de Piñeiro al ser tan específica en su aplicación, no deja otra alternativa que sólo compararla con el grupo de hormigones confeccionados con cementos alta resistencia, ya que los componentes de los cementos corrientes, que componen el grupo de hormigones confeccionados con éstos, no se asemejan en su composición a ninguno de los que la fórmula propone.

Caso contrario, en el grupo de hormigones confeccionados con cementos alta resistencia, tienen semejanzas en su composición con los cementos de alta resistencia que Piñeiro estudió.

El procedimiento es bastante sencillo, en una planilla electrónica se calculan los nuevos valores predecidos para la resistencia a la compresión a los 28 días de edad.

A la variable obtenida experimentalmente se le llamo: Observado R28

A la variable obtenida de la aplicación de la fórmula se le llamo: Piñeiro R28

⁽³⁾ Piñeiro, Moisés. Relación entre las Resistencias a Compresión de Hormigones a 7 y a 28 días. Revista del IDIEM, Vol. 2, 1963. pp.33.

Ingresando las variables al programa estadístico para su comparación, se obtuvieron los siguientes resultados:

Two-Sample Comparison - Piñeiro R28 & Observado R28

Summary Statistics

	Piñeiro R28	Observado R28
Count	731	731
Average	346,678	345,672
Median	347,428	342,0
Mode		339,0
Geometric mean	340,368	336,618
Variance	3827,32	5420,4
Standard deviation	61,8654	73,6234
Minimum	73,989	51,0
Maximum	566,066	595,0
Range	492,077	544,0
Lower quartile	313,537	308,0
Upper quartile	379,507	384,0
Interquartile range	65,97	76,0
Skewness	-0,232053	0,019134
Kurtosis	2,20678	1,91988

Se pueden observar que existen diferencias en las medidas estadísticas, en especial en la varianza y en la desviación estándar.

Para poder observar la comparación de mejor manera entre las variables revisemos los gráficos 43 y 44.

Gráfico 43.- Histogramas de comparación.

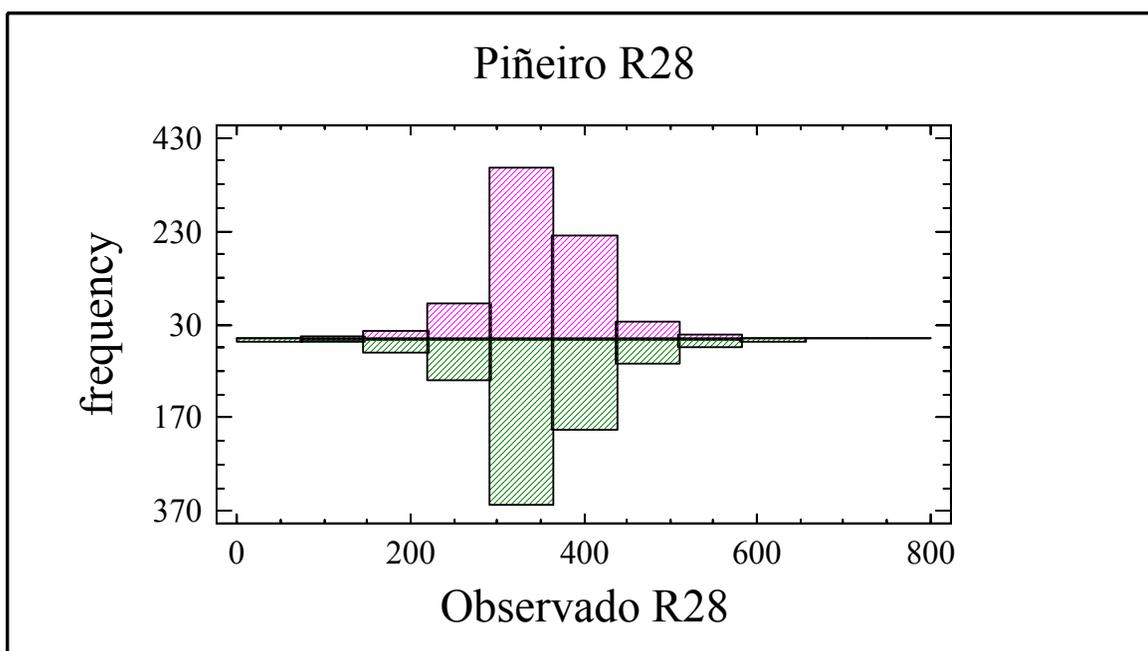
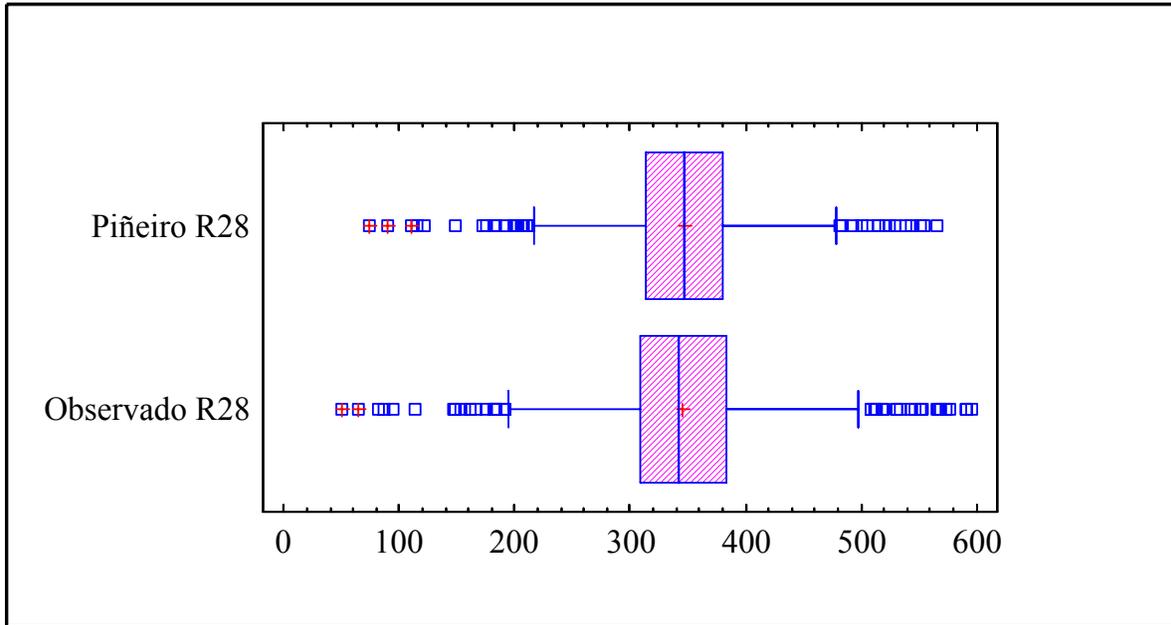


Gráfico 44.- Diagramas de Box de comparación.



Veamos si existe una diferencia estadística significativa entre la media de ambas variables, para esto se usó el programa estadístico entregando el siguiente resultado:

Multiple Range Tests

Method: 95,0 percent LSD

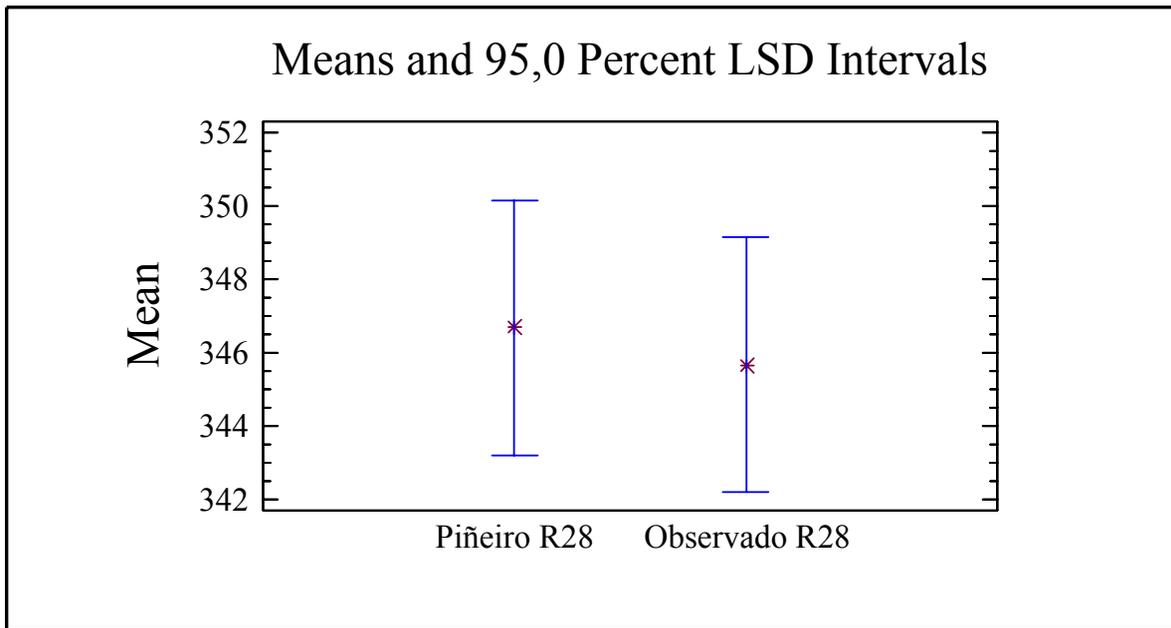
	Count	Mean	Homogeneous Groups
Observado R28	731	345,672	X
Piñeiro R28	731	346,678	X

Contrast	Difference	+/- Limits
Piñeiro R28 - Observado R28	1,00635	6,9712

Al ver la diferencia de 1,00635, se puede concluir que no existe una diferencia estadística significativa entre la media de las variables analizadas con un nivel de confianza de 95%.

En el gráfico 45 se puede apreciar esta mínima diferencia.

Gráfico 45.- Diferencia en la media de la variable observada y la predecida por fórmula de Piñeiro.



Veamos ahora si existe una diferencia estadística significativa entre la varianza de ambas variables, para esto se usó el programa estadístico entregando el siguiente resultado:

Multiple-Sample Comparison
Variance Check

Cochran's C test: 0,586134 P-Value = 0,0000027603
 Bartlett's test: 1,01518 P-Value = 0,00000276036
 Hartley's test: 1,41624
 Levene's test: 11,5343 P-Value = 0,000683349

En este test la hipótesis nula es que la desviación estándar entre las dos variables es la misma. Como el menor de los P-value es menos que 0.05, existe una diferencia estadística significativa entre la desviación estándar de las variables, con un 95% de nivel de confianza.

En la tabla 12 se resume la información en cuanto a la tendencia de la fórmula de Piñeiro a sobrestimar o a subestimar los resultados.

Tabla 12.-Estimación de la Fórmula de Piñeiro

Estimación del comportamiento del Error	n° < 5%	5% < n° < 10%	10% < n° < 15%	15% < n° < 20%	20% < n° < 50%	TOTAL
Muestras subestimadas	178	103	27	2	0	310
% Subestimación	43,73%	45,78%	34,62%	25%	0%	42,41%
Muestras sobrestimadas	229	122	51	6	13	421
% Sobrestimación	56,27%	54,22%	65,38%	75%	100%	57,59%
TOTAL	407	225	78	8	7	731

La diferencia entre la cantidad de muestras sobrestimadas y subestimadas es decisiva para tomar la decisión de utilizar esta formula para predecir la resistencia del hormigón a la compresión.

6.3. CONCLUSIONES DE LAS CONTRASTACIONES EFECTUADAS

Después de haber analizado gráfica y estadísticamente las fórmulas o propuestas de predicción de resistencia a los 28 días de edad, se procederá a resumir en la tabla 13 y 14, los porcentajes de precisión de error con respecto al total de las muestras utilizadas para su contrastación.

Tabla 13.- Porcentaje de muestras en cada Banda de Error. (Total muestras 1352)

Propuesta	BANDA DE ERROR						
	± 5%	± 10%	± 15%	± 20%	± 25%	± 30%	± 35%
ROS	19,67	43,50	62,16	83,95	92,90	98,22	100

Tabla 14.- Porcentaje de muestras en cada Banda de Error. (Total muestras 731)

Propuesta	BANDA DE ERROR					
	± 5%	± 10%	± 15%	± 20%	± 30%	± 50%
PIÑEIRO	55,68	86,46	97,13	98,22	99,32	100

Los mejores resultados se obtuvieron con la propuesta de predicción de Moisés Piñeiro, la cual en la banda de error de $\pm 5\%$ de precisión, contempla un 55,68% del total de muestras analizadas. La muestra que se usó para su contrastación corresponde al grupo de hormigones confeccionados con cementos de alta resistencia de la base de datos. Además se puede decir que tiene una estimación bastante razonable, ya que en la banda de error de $\pm 15\%$ de precisión, están el 97,13% de las muestras analizadas.

Para ambas propuestas se consideraron hormigones con cementos para los cuales no estaban elaboradas.

En el caso de la propuesta de Piñeiro, las muestras consideradas incluían cementos de alta resistencia para los cuales la fórmula no fue elaborada.

En el caso de la propuesta de Ros, se consideró el total de las muestras, uniéndolos ambos grupos, por la sencilla razón de que en esa forma se aplica en Chile.

CAPITULO VII ANALISIS DE RESULTADOS

Después de todos los análisis desarrollados con el objetivo de obtener una fórmula de predicción para la resistencia a la compresión para los hormigones confeccionados en la Comuna de Valdivia, se puede decir que este objetivo fue más allá de lo propuesto inicialmente, ya que se logró elaborar una fórmula de predicción para los hormigones confeccionados en la Provincia de Valdivia. Esta fórmula, es aplicable a la mayoría de las clases de cementos que se confeccionan en Chile. Esto se logra gracias a la gran variedad de cementos con los que se confeccionaron los hormigones que componen las muestras de la base de datos. Se destaca que la única clase de cemento que no participa en la base de datos, son los Cementos Puzolánicos. Para las otras tres clases de cementos que existen en Chile, la fórmula propuesta puede ser aplicada.

La fórmula propuesta por esta Memoria de Título se expresa de la siguiente manera:

$$R_{28} = \frac{R_7}{k}$$

siendo:

R_{28} : Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días de edad, para probetas cúbicas de 200 mm de arista, en kgf/cm^2 .

R_7 : Resistencia a la compresión del hormigón a los 7 días de edad, para probetas cúbicas de 200 mm de arista, en kgf/cm^2 .

k : Constante que depende del grado del cemento utilizado en la confección del hormigón. Tomando los siguientes valores para cada grado de cemento:

- Cemento grado Alta Resistencia: $k = 0,757119$
- Cemento grado Corriente: $k = 0,635412$

Además se analizó la precisión de la fórmula propuesta por esta Memoria de Título, para observar su estimación aplicada a las muestras de la base de datos utilizada para su elaboración. Información que se resume en la tabla 15.

Tabla 15.- Porcentaje de muestras de la base de datos, en cada banda de error.

Propuesta Memoria de Título	BANDA DE ERROR			
	± 5%	± 10%	± 15%	± 20%
Hormigones (C.A.R.) ¹ (731 muestras)	58,69	90,15	100	100
Hormigones (C.C.) ² (621 muestras)	37,84	71,01	96,94	100
Efecto total sobre base de datos (1352 muestras)	49,11	59,17	98,59	100

De los resultados que se obtienen de la aplicación de la fórmula propuesta y de su contrastación con los resultados experimentales del banco de datos, se puede observar que no presenta altos niveles de imprecisión, con un porcentaje máximo de error $\pm 20\%$, y en especial en la banda del $\pm 15\%$, donde se encuentran aproximadamente el 100% de las muestras totales.

Lo anterior implica el buen comportamiento de la fórmula en la estimación de la resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días de edad.

Para la comparación de la fórmula propuesta por esta Memoria de Titulación, se contrastaron las muestras de la base de datos con dos fórmulas seleccionadas para este objetivo donde la primera fórmula corresponde a la más usada en el país, es una propuesta extranjera (Alemania, 1928) y la segunda fue confeccionada para hormigones confeccionados en Chile (Santiago, 1963). En la tabla 16 y 17 se resume la precisión lograda por las fórmulas seleccionadas para la contrastación.

Tabla 16.- Porcentaje de muestras en cada Banda de Error. (Total muestras 1352)

Propuesta	BANDA DE ERROR						
	± 5%	± 10%	± 15%	± 20%	± 25%	± 30%	± 35%
ROS (1352 muestras)	19,67	43,50	62,16	83,95	92,90	98,22	100
ROS (673 muestras) ³	12,18	29,12	48,88	73,40	88,26	97,03	100

En la tabla 16 se agregó la estimación de la precisión aplicando la propuesta sólo a hormigones confeccionados con cementos portland y portland puzolánicos, para observar su respuesta en el caso de usarla sólo con estos cementos. Como se puede apreciar las variaciones en la precisión no son significativas, comparando entre las dos contrastaciones realizadas para esta propuesta.

¹ C.A.R. = Cemento alta resistencia.

² C.C. = Cemento Corriente.

³ Aplicado sólo a Cementos portland puzolánicos y portland de las muestras de la base de datos.

Tabla 17.- Porcentaje de muestras en cada Banda de Error. (Total muestras 731)

Propuesta	BANDA DE ERROR					
	± 5%	± 10%	± 15%	± 20%	± 30%	± 50%
PIÑEIRO	55,68	86,46	97,13	98,22	99,32	100

Al comparar con los resultados obtenidos por la fórmula propuesta por esta Memoria de Titulación, se observa que la gran diferencia con la propuesta de Ros es la precisión, ya que ésta llega a niveles superiores a los $\pm 20\%$ de error, incluso se puede decir, que en la banda $\pm 25\%$ de error, recién se empieza a obtener aproximadamente el 90% de las muestras.

La propuesta de Piñeiro, es bastante aceptable, pudiéndose decir que a pesar de los avances que han existido desde la década en que se elaboró esta fórmula, sigue siendo representativa. La ventaja de la fórmula de predicción propuesta por esta Memoria sobre la propuesta de Piñeiro, radica en su aplicabilidad a las distintas clases de cemento.

CAPITULO VIII CONCLUSIONES

- Sobre la base de las muestras que conformaron la base de datos, se elaboró una fórmula empírica de predicción de resistencia a la compresión para hormigones confeccionados en la Provincia de Valdivia, que se expresa de la forma:

Fórmula empírica de predicción de la resistencia a la compresión de los hormigones confeccionados en la Provincia de Valdivia

$$R_{28} = \frac{R_7}{k}$$

siendo:

R_{28} : Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días de edad, para probetas cúbicas de 200 mm de arista, en kgf/cm².

R_7 : Resistencia a la compresión del hormigón a los 7 días de edad, para probetas cúbicas de 200 mm de arista, en kgf/cm².

k : Constante que depende del grado del cemento utilizado en la confección del hormigón. Tomando los siguientes valores para cada grado de cemento:

- Cemento grado Alta Resistencia: $k = 0,757119$
- Cemento grado Corriente: $k = 0,635412$

- La potencia predictiva de la fórmula empírica propuesta, es de un 97,5% para los hormigones confeccionados con cemento grado alta resistencia y un 92,4% para los hormigones confeccionados con cemento grado corriente.
- Para obtener óptimos resultados en la aplicación de la fórmula empírica propuesta, se debe tener en cuenta las siguientes condiciones:
 - Los hormigones confeccionados con cementos alta resistencia deben ser dosificados de manera de obtener una curva de desarrollo de resistencia, en la que se obtengan a los 7 días, porcentajes de la resistencia final que estén dentro de los siguientes límites: [68% - 88%]
 - Los hormigones confeccionados con cementos corrientes deben ser dosificados de manera de obtener una curva de desarrollo de resistencia, en la que se obtengan a los 7 días, porcentajes de la resistencia final que estén dentro de los siguientes límites: [55% - 75%]

- La aspiración inicial de esta Memoria de Título era obtener una fórmula que se aplicará en la Comuna de Valdivia, finalmente como resultado se obtuvo una fórmula que puede ser aplicada a la Provincia de Valdivia.
- Sobre la base del banco de datos, se obtuvo una fórmula de predicción que por su sencilla estructura es de fácil aplicación, lo que implica su gran utilidad como herramienta de apoyo para el control de los hormigones en terreno, ya que no requiere de mayor tiempo ni recursos para su uso.
- Al comparar la fórmula empírica propuesta por esta Memoria con la fórmula de Ros (Alemania,1928), se pudo concluir que la ventaja que se tiene sobre ésta, se debe principalmente a su baja representatividad sobre la diversidad de tipos y calidades de hormigones utilizados en la actualidad.
- Al comparar la fórmula empírica propuesta por esta Memoria con la fórmula de Piñeiro (Chile, 1963), se pudo concluir que la ventaja que se tiene sobre ésta, se debe a que Piñeiro propone un conjunto de fórmulas, según cuatro tipos de cementos* utilizados en la confección del hormigón, lo cual significa que no se puede aplicar a gran parte de los cementos que se usan hoy en día en la Provincia de Valdivia, por otro lado su propuesta tiene limitaciones en cuanto a las condiciones de curado de las probetas, siendo éstas distintas a las usadas en la actualidad, que se rigen por la Norma Chilena NCh1017. Of75. *“Hormigón- Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción”*.
- Al analizar las 2.669 muestras que componen la base de datos, se confirma la importancia que tiene el control de la resistencia a la compresión del hormigón a temprana edad, y la necesidad de herramientas que puedan estimar o predecir sus resultados con antelación a los 28 días, debido a la existencia de un gran número de muestras que no cumplían con los resultados esperados.
- Si bien la fórmula de predicción propuesta por esta Memoria, se desarrolló basándose en los hormigones confeccionados en la Provincia de Valdivia, esto no significa que no pueda ser usada en otras zonas del país en donde existan condiciones similares tanto ambientales, como características físico – química de los componentes en la confección de los hormigones.

* Piñeiro elaboró cuatro fórmulas para cada uno de los siguientes tipos de cementos: Melón tipo A, Melón Extra, Polpaico Especial, Polpaico Especial 400.

BIBLIOGRAFIA

ASOCIACION Argentina del Hormigón Elaborado. Manual del uso del Hormigón Elaborado [en línea]. Argentina, [fecha de consulta: 12 febrero 2005]. Disponible en: <
<http://www.hormigonelaborado.com/manual-7.htm>>.

CANAVOS, George. Probabilidad y Estadística. México, McGraw-Hill, 1988. 651 p.

DATE, Chetan and SCHNORMEIER, Russell. Use of Prediction Relations. ACI Journal Technical Paper,(82): 525-530, July-August 1985.

DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte, [fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en:
<http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/reologT9.htm>.

DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte, [fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en:
<http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/fragT9.htm>.

DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte, [fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en:
<http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/accioT9.htm>.

DEPARTAMENTO de Construcción Civil. Tecnología del Hormigón. Universidad Católica del Norte, [fecha de consulta: 12 abril 2004]. Disponible en:
<http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/miscelaneoT9.htm>.

EBENSPERGER, Luis. Los Aridos en la Construcción. Revista BIT. Mayo, 2003. pp. 26-29.

GRUPO de Empresas Polpaico. Manual del Constructor, 2002

GUJARATI, Damodar. Econometría Básica. México, McGraw - Huí, 1981.

INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual de Ensayos, Aridos y Hormigón. I.Ch.C.H., Santiago, 1989.83p.

INSTITUTO Chileno del Cemento y del Hormigón. Manual del Hormigón. 3era. ed. I.Ch.C.H., Santiago, 1988.100 p.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Cemento- Terminología, clasificación y especificaciones generales. NCH148: Of68. Santiago, Chile, 1968. 8p.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Aridos - Determinación de partículas desmenuzables. NCH1327: Of77. Santiago, Chile, 1977.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Aridos - Determinación del desgaste de las gravas - Método de la máquina de Los Angeles. NCH1369: Of78. Santiago, Chile, 1978.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Hormigón - Requisitos generales. NCH170: Of85. Santiago, Chile,1985.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Hormigón - Extracción de muestras del hormigón fresco. NCH171: EOI75. Santiago, Chile, 1975.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del Cono de Abrams. NCH1019: EOI74. Santiago, Chile, 1974.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. NCH1037: Of77. Santiago, Chile, 1977.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Hormigón - Agua del amasado - Requisitos. NCH1498: Of82. Santiago, Chile, 1982.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Cemento - Puzolana para uso en cementos- Especificaciones. NCH161: Of68. Santiago, Chile, 1968.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Aridos para morteros y hormigones - Requisitos generales. NCH163: Of79. Santiago, Chile, 1979.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Aridos - Tamizado y determinación de la granulometría. NCH165: Of77. Santiago, Chile, 1977.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Aridos - Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas. NCH1117: Of77. Santiago, Chile, 1977.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Aridos - Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas. NCH1239: Of77. Santiago, Chile, 1977.

INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Hormigón preparado en central hormigonera. NCH1934: Of1992. Santiago, Chile, 1992.

INSTITUTO Chileno del Cemento. Tecnología del Hormigón. En: Seminario de Tecnología del Hormigón en Pavimentos de Calles. Santiago, 1974. 104 p.

MINISTERIO de Obras Publicas. Curso laboratorista Vial, Vol III 2do. ed. Laboratorio Nacional de Vialidad, Santiago, 1986.

MONTOYA, Pedro, GARCIA, Alvaro y MORAN, Francisco. Hormigón Armado. 14^a. ed. Editorial Gustavo Gili, SA, Barcelona, 2000.

NEVILLE, Adam y BROOKS, J. Tecnología del Concreto. México, Trillas, 1998. 329 p.

PEÑA, Daniel. La Descripción de Datos. En su: Estadística Modelos y Métodos Tomo I Fundamentos. Madrid, Alianza Editorial, 1992. pp. 45-75.

PIÑEIRO, Moisés. Relación entre las Resistencias a Compresión de Hormigones a 7 y a 28 días. Revista del IDIEM, Vol. 2, 1963. pp. 33.

SIEGEL, Andrew. Statics and Data Análisis. United States of America, John Wiley & Sons Inc., 1988. 523 p.

ZABALETA, Hernán. Compendio de Tecnología del Hormigón. Instituto Chileno del Cemento y del hormigón, Santiago, 1992. 144p.