

Universidad Austral De Chile

Facultad De Ciencias De La Ingeniería
Escuela De Ingeniería Civil En Obras Civiles.



HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA H-70

Tesis para optar al título de:
Ingeniero Civil En Obras Civiles.

Patrocinante:
Hernán Arnés Valencia.
Ingeniero Civil.

Ingeniero Co-Patrocinante:
Iván Cuevas Romero.

CLAUDIO ANDRÉS SEGUEL HERRERA.

VALDIVIA – CHILE

2006

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a la Unidad de Suministros de Producción de la división “El Teniente” CODELCO-Chile, en especial al área de hormigones, por el apoyo técnico entregado durante el transcurso de esta investigación.

Además agradezco la excelente disposición y aporte técnico de los ingenieros Sr. Iván Cuevas R., Sr. Ramón Pérez Q. y Sr. Fernando krebs T. en el desarrollo de este trabajo.

También hago extensiva mi gratitud al departamento técnico de la empresa proveedora de hormigones para la división, PREMIX S.A. la cual entrego a disposición de esta investigación sus laboratorios y la materia prima.

Importante también es agradecer de forma muy especial a aquellas personas que estuvieron apoyándome desde siempre y desinteresadamente, me refiero a mis padres, mi hermano y todos mis compañeros y amigos.

Claudio Andrés Seguel Herrera.

Indice General.

INDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	7
ÍNDICE DE GRÁFICOS	8
RESUMEN	9
SUMMARY	10
CAPÍTULO I INTRODUCCION	11
1.1. Planteamiento Del Problema.....	11
1.2. Objetivos.....	13
1.2.1. Objetivo general.	13
1.2.2. Objetivos específicos:	13
1.3. Metodología.....	14
1.4. Estructura De la Tesis.	15
1.5. Alcances Y Limitaciones.	16
1.6. Antecedentes Bibliográficos.....	16
CAPÍTULO II ANTECEDENTES	17
2.1. Reseña Histórica.	17
2.2. Estado De La Norma En Chile.	18
2.3. Definición De Alta Resistencia.	19
2.4. Factores Que Influyen En La Obtención De Altas Resistencias.....	19
2.4.1. Cemento.....	20
2.4.2. Áridos.	20
2.4.3. Superplastificante.....	21
2.4.4. Relación Agua/Cemento.	22
2.4.5. Compatibilidad Cemento- Superplastificante.....	23
2.4.6. Adiciones Al Cemento.....	24
2.4.6.1. Cenizas volantes.....	24
2.4.6.2. Escorias molidas de alto horno.....	25
2.4.6.3. Humo de sílice.	25

2.4.6.4.	Puzolanas naturales.....	25
2.4.6.5.	Utilización de adiciones al cemento.....	26
2.4.7.	Propiedades Del Hormigón Con Adiciones.....	26
2.4.7.1.	Resistencias.....	27
2.4.7.2.	Durabilidad.....	27
CAPÍTULO III NECESIDAD DE ALTAS RESISTENCIAS EN LA MINA EL TENIENTE.....		28
3.1.	Hormigones En La Minería.....	28
3.2.	Planteamiento Específico Para La Mina “El Teniente”.....	30
3.2.1.	Solicitaciones producidas por el LHD a la carpeta de hormigón.....	32
3.3.	Experiencia Sobre Pavimentos En La Mina De Cobre El Teniente.....	34
3.3.1.	Análisis del comportamiento de las carpetas en el sector Fortuna.....	34
3.3.2.	Drenaje o saneamiento de las aguas presentes.....	36
3.4.	Las Aguas Ácidas En La Mina Y Su Influencia Sobre El Hormigón.....	37
3.4.1.	Ataque ácido en el hormigón.....	38
3.4.2.	Ataque por sulfato al hormigón.....	39
3.5.	El Hormigón Y Su Resistencia A La Abrasión.....	41
3.6.	Análisis De Algunos De Los Pavimentos Utilizados En La Mina.....	42
3.6.1.	Pavimento de grava o estabilizado compactado.....	42
3.6.2.	Pavimento de roca nivelada.....	42
3.6.3.	Pavimento articulado o de bloque de hormigón.....	43
3.6.4.	Pavimento de asfalto.....	43
3.6.5.	Pavimentos de hormigón (Cemento hidráulico).....	45
3.6.6.	Observaciones.....	45
3.7.	Carpeta de Hormigón de Alta Resistencia.....	46
CAPÍTULO IV HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA “H-70” EN LA DIVISIÓN EL TENIENTE.....		47
4.1.	Introducción.....	47
4.2.	Carpeta de hormigón H-70.....	48
4.3.	Microsílice (sílice en polvo).....	50
4.3.1.	Incorporación de microsíllice en hormigones.....	52
4.3.1.1.	Propiedades de los hormigones con microsíllice incorporada.....	53
4.3.1.2.	Desventajas de hormigones con microsíllice incorporada.....	54
4.4.	Nanosílice O Sílice En Solución.....	56
4.4.1.	Llegada de la Nanosílice a la división El Teniente.....	56
4.4.2.	Nanotecnología en el Hormigón.....	57
4.4.3.	Comparación entre Microsílice, Sílice Precipitada, y Nanosílice.....	59
4.5.	Reemplazo de la Microsílice.....	60

CAPÍTULO V FORMULACIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL Y ENSAYO DE HORMIGONES.	62
5.1. Introducción.....	62
5.2. Planificación De La Experiencia.....	63
5.2.1. Introducción.....	63
5.2.2. Esquema general.....	63
5.2.3. Elementos constantes.....	64
5.2.4. Elementos variables.....	64
5.2.5. Determinación de los ensayos a realizar.....	65
5.3. Descripción Y Análisis De Los Materiales.....	66
5.3.1. Introducción.....	66
5.3.2. Cemento.....	66
5.3.3. Áridos.....	67
5.3.3.1. Arena 3/8" (10 mm.).....	67
5.3.3.2. Gravilla 3/4" (20 mm.).....	70
5.3.4. Aditivos.....	72
5.3.5. Adiciones.....	73
5.3.6. Agua.....	73
5.4. Procedimientos para el Desarrollo de la Experiencia.....	74
5.4.1. Introducción.....	74
5.4.2. Preparación de las mezclas de hormigones de prueba.....	74
5.4.3. Determinación de la trabajabilidad y docilidad del hormigón.....	75
5.4.4. Confección y curado de las probetas de hormigón.....	75
5.4.4.1. Apisonamiento:.....	75
5.4.4.2. Vibrado:.....	76
5.4.5. Ensayo de resistencia a compresión de las probetas.....	77
5.5. Desarrollo De La Experiencia.....	78
5.5.1. Introducción.....	78
5.5.2. Preparación De Las Mezclas De Hormigón.....	78
5.5.3. Determinación De La Trabajabilidad De Los Hormigones.....	80
5.5.3.1. Realización de la experiencia para los H-30.....	80
5.5.3.2. Realización de la experiencia para los H-70.....	84
5.6. Confección Y Curado De Probetas De Hormigón.....	88
5.7. Ensayo De Resistencia A La Compresión De Los Hormigones De Prueba.....	89
5.8. Resultado De Los Hormigones De Prueba.....	91
CAPÍTULO VI ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	92
6.1. Influencia De La Edad En La Resistencia De Los Hormigones.....	92
6.1.1. Hormigones de prueba H-30.....	93

6.1.2.	Hormigones de prueba H-70.....	95
6.2.	Relaciones De Resistencia.	97
6.2.1.	Para hormigones H-30.....	97
6.2.2.	Para hormigones H-70.....	100
6.2.3.	Comparaciones entre hormigones patrones.....	102
6.3.	Influencia Del Árido En La Obtención De Altas Resistencias.	103
6.3.1.	Rotura de probetas de hormigón patrón.....	103
6.3.2.	Rotura de probetas de hormigón con Nanosílice.	105
6.3.3.	Rotura de probetas de hormigón con Microsílice.	107
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES.....		109
7.1.	Conclusiones Para Los Hormigones H-30.....	109
7.2.	Conclusiones Para Los Hormigones H-70.....	110
ANEXOS.....		115
	Evaluación Estadística de la Resistencia Mecánica (NCh 1998 Of. 89.).....	115
	Posturas De Hormigón H-70.....	120
BIBLIOGRAFÍA.....		124

Índice de Figuras

<i>Figura 1.</i>	<i>Forma y dimensiones de las galerías.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2.</i>	<i>Corte transversal de una zanja.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.</i>	<i>Esquema del equipo LHD.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.</i>	<i>Planta e intersección Calle- Punto de Extracción.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.</i>	<i>Corte trasversal de Galería.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 6.</i>	<i>Comparación entre tamaños de los materiales (Nanómetros).....</i>	<i>57</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla N°1.</i>	<i>Configuración de cargas LHD.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla N°2.</i>	<i>Muestras de aguas agresivas sector Fortuna.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla N°3.</i>	<i>Grado de ataque según la exposición de sulfatos (NCh 170 Of. 85).....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla N°4.</i>	<i>Características de comportamiento para diferentes formas de microsílice.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla N°5.</i>	<i>Características generales de la nanosílice, microsílice y sílice precipitada.....</i>	<i>59</i>

Tabla N°6.	<i>Diferencia entre Nanosílice y Microsílice.</i>	60
Tabla N°7.	<i>Parámetros máximos de la arenas</i>	68
Tabla N°8.	<i>Características físicas de la arena.</i>	69
Tabla N°9.	<i>Banda granulométrica de la arena.</i>	69
Tabla N°10.	<i>Parámetros máximos de la gravilla.</i>	70
Tabla N°11.	<i>Características físicas de la gravilla.</i>	71
Tabla N°12.	<i>Banda granulométrica de la gravilla.</i>	71
Tabla N°13.	<i>Características del hormigón de prueba N°1, H-30.</i>	80
Tabla N°14.	<i>Características del hormigón de prueba N°2, H-30.</i>	81
Tabla N°15.	<i>Características del hormigón de prueba N°3, H-30.</i>	82
Tabla N°16.	<i>Características del hormigón de prueba N°4, H-30.</i>	82
Tabla N°17.	<i>Características del hormigón de prueba N°1, H-70.</i>	84
Tabla N°18.	<i>Características del hormigón de prueba N°2, H-70.</i>	85
Tabla N°19.	<i>Características del hormigón de prueba N°3, H-70.</i>	86
Tabla N°20.	<i>Resistencias alcanzadas por los hormigones de prueba H-30.</i>	91
Tabla N°21.	<i>Resistencias alcanzadas por los hormigones de prueba H-70.</i>	91
Tabla N°22.	<i>Relaciones de resistencia con respecto al hormigón patrón, HP/ H-30.</i>	97
Tabla N°23.	<i>Relaciones de resistencias, HP/ H-30.</i>	98
Tabla N°24.	<i>Relaciones de resistencia con respecto al hormigón patrón, HP/ H-70.</i>	100
Tabla N°25.	<i>Relaciones de resistencia, HP/ H-70.</i>	101
Tabla N°26.	<i>Relaciones de resistencia para hormigones patrones.</i>	102

Índice de Fotografías

Fotografía N°1	<i>Empuje de equipo LHD sobre frontón de rocas.</i>	33
Fotografía N°2	<i>Fotografía electrónica de Nanosílice a 100 nm.</i>	58
Fotografía N°3	<i>Mezclado de hormigón con microsílice, H70/ HP-3.</i>	79
Fotografía N°4	<i>Vibrado de probetas de hormigón.</i>	81
Fotografía N°5	<i>Ensayo del cono de Abrams, H70/ HP-1.</i>	84
Fotografía N°6	<i>Ensayo del cono de Abrams, H70/ HP-2.</i>	85
Fotografía N°7	<i>Hormigón de prueba N°3, H70/ HP-3.</i>	86
Fotografía N°8	<i>Ensayo del cono de Abrams, H70/ HP-3.</i>	87
Fotografía N°9	<i>Probetas de hormigón terminadas.</i>	88
Fotografía N°10	<i>Cámara de curado.</i>	89
Fotografía N°11	<i>Ensayo de resistencia a la compresión.</i>	90
Fotografía N°12	<i>Probetas de hormigón ensayadas.</i>	90
Fotografía N°13	<i>Probeta ensayada de Hormigón Patrón "H-70"</i>	104
Fotografía N°14	<i>Acercamiento a probeta de Hormigón Patrón "H-70"</i>	104
Fotografía N°15	<i>Probeta ensayada, Hormigón de Prueba N°2 "H-70"</i>	105
Fotografía N°16	<i>Probeta ensayada, Hormigón de Prueba N°2 "H-70"</i>	106
Fotografía N°17	<i>Probeta ensayada, Hormigón de Prueba N°3 "H-70"</i>	107

<i>Fotografía N°18</i>	<i>Probeta ensayada, Hormigón de Prueba N°3 "H-70"</i>	<i>108</i>
<i>Fotografía N°19</i>	<i>Planta de hormigón interior mina.....</i>	<i>113</i>
<i>Fotografía N°20</i>	<i>Monitoreo del proceso de fabricación del hormigón.....</i>	<i>113</i>
<i>Fotografía N°21</i>	<i>Envases de aditivos y adiciones.....</i>	<i>114</i>

Índice de Gráficos

<i>Gráfico N°1.</i>	<i>Granulometría promedio del semestre de la arena.....</i>	<i>69</i>
<i>Gráfico N°2.</i>	<i>Granulometría promedio del semestre de la gravilla.....</i>	<i>71</i>
<i>Gráfico N°3.</i>	<i>Resistencia a la compresión, Hormigones de Prueba H-30.....</i>	<i>93</i>
<i>Gráfico N°4.</i>	<i>Ganancia de resistencias a tempranas edades para Hormigones de Prueba H-30.....</i>	<i>94</i>
<i>Gráfico N°5.</i>	<i>Resistencia a la compresión, Hormigones de Prueba H-70.....</i>	<i>95</i>
<i>Gráfico N°6.</i>	<i>Ganancia de resistencias a tempranas edades para Hormigones de Prueba H-70.....</i>	<i>96</i>

HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA H-70

Por muchos años la microsílíce (adición al hormigón), fue utilizada en la división “El Teniente” para la confección de las carpetas de hormigón de 70 MPa. de resistencia a la compresión a los 28 días de edad. Al hacer un análisis general, estas carpetas presentaron un buen desempeño en sus resistencias, pero también se observaron ciertas desventajas debido principalmente al estado en polvo en el que se encuentra la microsílíce, lo que trae como consecuencia en el hormigón: segregación, aglomeración de micro-esferas de sílice, aumento en la retracción y lo mas relevante problemas en la salud de los operadores y al medio ambiente.

La división El Teniente en vías de certificación ISO 14.001 (gestión y protección ambiental) en la minería Chilena, le pide al proveedor de aditivos, una adición para reemplazar la microsílíce, que tenga las propiedades positivas de esta, pero que evite sus desventajas, de esta forma entonces, llega la nanosílíce o sílice en solución a la división.

El presente trabajo de titulación tiene por objetivo analizar el uso y desempeño de los Hormigones de Alta Resistencia “H-70”, aplicados en la división El Teniente, observando la influencia de esta nueva adición, nanosílíce o sílice en solución, para determinar las modificaciones y mejoras de las propiedades del hormigón.

Para esto se realizaron experiencias con las dosificaciones utilizadas en la división y la incorporación de las correspondientes adiciones (microsílíce y nanosílíce).

Summary

H-70 HIGH RESISTANCE CONCRETE

For many years in the “El Teniente” division, the microsilica (concrete addition), has been used for confecting concrete carpets of 70 MPa compression resistance at 28 days. In a general analysis of this method, the carpets showed a good resistance performance; however, some disadvantages were also observed. The observed problems can be attributable to the powder condition of the microsilica. This can carry the following consequences in concrete: segregation, silica microspheres agglomeration, retraction increment and most important, environmental and operator’s health problems.

El Teniente division, in the process of ISO 14001 certification, demands to the additive providers an addition in replacement of microsilica. Thus the Nanosilice or in solution silica, which exhibit the goodness but not the disadvantages of the microsilica became used in El Teniente division.

The objective of this thesis is to analyze in El Teniente division, the “H-70” high resistance concrete performance, using the nanosilica or in solution silica addition. Evaluation under dosages utilized in the division and the addition of the correspondent solutions (microsilica and nanosilica) were carry on.

1.1. Planteamiento Del Problema.

El tema a desarrollar en esta memoria consiste en el estudio de una nueva adición (Nanosílice o sílice en solución) utilizada en la confección de los Hormigones de Alta Resistencia H-70, aplicados en la mina de cobre subterránea “El Teniente” de CODELCO- CHILE.

Para un mejor entendimiento es necesario explicar las condiciones presentes en la mina, que hacen necesario la utilización de estos hormigones.

En el interior de la mina, hay sectores que se caracterizan por el escurrimiento de abundante agua, en especial donde se encuentra la interfase entre la roca primaria y secundaria, conformando un plano de falla que permite el afloramiento de dicha agua.

La presencia de agua en adición con el polvo de roca, producto de faenas de explotación minera, produce un gran lodazal que entorpece la circulación de los equipos encargados de cargar y transportar el mineral obtenido en los puntos de extracción y llevado hacia los puntos de vaciado. Esto se traduce en fuertes pérdidas de rendimiento en las faenas de producción, además de los aumentos en los costos, por conceptos de mantención y reparación de los equipos LHD.

El tipo de equipo utilizado, llamado SCOOPTRAM o LHD. (Load, Haul, Dump; cargó, transporte y vaciado), los cuales son una especie de cargador frontal, diseñados especialmente para la minería, así como las condiciones presentes en el lugar, hacen que el hormigón utilizado en las carpetas, tengan características muy especiales.

En la búsqueda de obtener la solución más adecuada para las carpetas de hormigón, se han implementado diferentes soluciones en la división. Una de las cuales consistió en el diseño de una carpeta de hormigón con resistencia especificada a los 28 días de 50 MPa (500 kg/cm²). Pero para lograr estos niveles de resistencia sin incurrir en elementos especiales (adiciones), es

necesario: dosis de cemento muy altas, baja relación agua/cemento (lo que obliga a utilizar aditivos reductores de agua o superplastificantes) y un control muy exhaustivo durante el proceso de fraguado del hormigón.

El problema de este diseño, es que la carpeta de hormigón no tiene la impermeabilidad necesaria para enfrentar el ataque de las aguas ácidas-sulfatadas presentes en la mina y en cuanto a su resistencia, las altas sollicitaciones producidas por el trabajo del equipo LHD deterioran la carpeta considerablemente.

Para enfrentar estos requerimientos, es necesario la utilización de un hormigón de alta resistencia mecánica, por encima de los valores usuales (50 Mpa), es decir, un hormigón con resistencia especificada a los 28 días de 70 Mpa, pero para alcanzar estas resistencias es indispensable la utilización de una adición (microsílice.)

El humo de sílice, sílica fume, o microsíllice es un material puzolánico que agregado al cemento puede producir hormigones de alta resistencia, se conoce desde hace más de cincuenta años en el mundo por las renombradas propiedades que le ocasiona al hormigón, mayor resistencia, menor permeabilidad, ahorro de cemento, entre otras.

Por muchos años esta adición (microsílice o sílice en polvo) fue utilizada en la división El Teniente para la confección de carpetas de hormigón de 700 kg/cm² de resistencia especificada a los 28 días. Al hacer un análisis general, estas carpetas presentaron un buen desempeño en sus resistencias, pero también se observaron ciertas desventajas debido principalmente al estado en polvo en el que se encuentra la microsíllice, lo que trae como consecuencia en el hormigón: segregación, aglomeración de micro-esferas de sílice, aumento en la retracción y lo más relevante problemas en la salud de los operadores y al medio ambiente.

La microsíllice al ser un sólido de pequeñas dimensiones, incluso más pequeña que el humo del cigarrillo (de ahí proviene su nombre "humo de sílice"), entra en los pulmones de los operadores y queda atrapada en los alvéolos pulmonares, con el tiempo produce fibrosis pulmonar y una enfermedad

irreversible llamada silicosis.

Por su parte la división El Teniente en vías de certificación ISO 14001 (gestión y protección ambiental) en la minería Chilena, le pide al fabricante de aditivos, una adición para reemplazar la microsílíce, que tenga las propiedades positivas de esta, pero que evite sus desventajas, es así entonces como llega la nanosílíce o sílice en solución a la división.

La nanosílíce consiste en nanopartículas de sílice modificadas químicamente para estar en solución, ser estables y tener mejores propiedades que la microsílíce, con la clara ventaja al estar en solución, de no contaminar al operador ni al medio ambiente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general.

El objetivo general de esta investigación es:

- Analizar el uso y desempeño de los hormigones de alta resistencia “H-70”, aplicados en la división El Teniente, observando la influencia de una nueva adición, nanosílíce o sílice en solución, para determinar las modificaciones y mejoras de las propiedades del hormigón.

1.2.2. Objetivos específicos:

Los objetivos específicos de esta investigación son:

- 1 Describir la necesidad en la utilización de los Hormigones de Alta Resistencia en la división El Teniente.
- 2 Analizar los beneficios que se producen, en el cambio de microsílíce a nanosílíce (sílice en solución).
- 3 Describir el control de calidad aplicado a los Hormigones de Alta Resistencia “H-70”.

1.3. Metodología.

En líneas generales, se realizarán hormigones de prueba con resistencia especificada a los 28 días, de 30 y 70 Mpa (H-30 y H-70), que incluyan el mínimo de elementos variables en su composición, estos hormigones se realizarán con las dosificaciones aplicadas actualmente en la división El Teniente, con el fin de observar en forma clara la influencia que genera la incorporación de adiciones y aditivos de última generación. Además, estos hormigones serán comparados con hormigones de tipo convencional (patrones).

Es así, que la experiencia se planificará tratando de abordar aquellos aspectos que proporcionen y permitan obtener la mayor información posible, que ayude a comprender las modificaciones y mejoras de las propiedades del Hormigón.

Para esto se realizarán 7 amasadas de 35 litros cada una, en Betonera de eje inclinado obteniéndose 8 probetas cúbicas de 15 centímetros de arista, que serán ensayadas de a dos, a edades de 3, 7, 28 y 56 días. Esto arroja un total de 56 ensayos.

El “*Esquema General*” es el siguiente:

✓ ***Planificación de la experiencia a realizar con los “H-30”***

- HP-1/ H-30, Patrón, Hormigón normal, (solo con agua)
- HP-2/ H-30, Teniente, Incorporación de Aditivos 1 y 2.
- HP-3/ H-30, Teniente, Incorporación de Aditivo 1 + Nanosílice.
- HP-4/ H-30, Potenciado, (Similar a prueba N°3)

✓ ***Planificación de la experiencia a realizar con los “H-70”***

- HP-1/ H-70, Patrón, Hormigón normal (solo con agua)
- HP-2/ H-70, Teniente; Incorporación de Aditivos 1 + Nanosílice.
- HP-3/ H-70, Teniente, Incorporación de Aditivos 3 + Aditivo 4 + Microsílice.

Nota:

Aditivo 1 y 3: Plastificantes, mantenedor de cono.

Aditivo 2 y 4: Superplastificantes, reductores de agua.

1.4. Estructura De la Tesis.

La memoria esta estructurada en 7 capítulos, en los cuales se muestran primero a modo de antecedentes, la realidad de los hormigones en Chile y cuales son los factores que influyen en la obtención de altas resistencias.

El siguientes capítulo, plantean la problemática de las carpetas de hormigón, teniendo en cuentas las limitaciones que se producen en el interior de una mina subterránea, además se hace un análisis de algunos de los pavimentos utilizados y se muestra cual ha sido su comportamiento frente a las condiciones altamente agresivas para el hormigón presentes en la mina.

Posteriormente se hace un resumen de la utilización de la microsílíce en los hormigones de alta resistencia H-70, analizando las condiciones y comportamiento que llevaron a la división “El Teniente”, a tomar la decisión de reemplazar esta microsílíce por la sílice en solución o nanosílíce.

Una vez que ya se ha hecho el planteamiento del problema, se procede a realizar la formulación del programa experimental y los ensayos de hormigones, para posteriormente realizar el análisis de los resultados.

Finalmente, producto del análisis cualitativo y cuantitativo se proponen las conclusiones del trabajo realizado.

Como anexos se adjuntan antecedentes sobre el control de calidad que se le aplica a los hormigones de alta resistencia H-70, se realiza un análisis estadístico, además se entregan algunas especificaciones sobre las posturas de estos hormigones en el interior de la mina.

1.5. Alcances Y Limitaciones.

No es parte de esta investigación determinar cual es la dosificación más adecuada para los hormigones de alta resistencia H-70, sino que utilizando las dosificaciones implementadas en la división El Teniente, determinar cuales son las modificaciones y mejoras que se producen en el hormigón, debido al cambio en la adición (de microsílíce a nanosílíce).

Por otra parte, el proveedor de hormigones en la división encargado del suministro interior mina, que corresponde a la empresa PREMIX S.A. Reserva el derecho de "Propiedad Intelectual", en las dosificaciones utilizadas para los hormigones de alta resistencia H-70, debido principalmente al trabajo que durante años se ha realizado en la investigación y diseño de las dosificaciones más adecuadas para estos hormigones y que por lo demás solo se utilizan en la división "El Teniente".

Es por esta razón, que en el desarrollo de esta memoria, no se entregan, las dosificaciones que se utilizaron para los hormigones de prueba.

1.6. Antecedentes Bibliográficos.

Las fuentes de información utilizadas en esta memoria fueron:

- ✓ Apoyo bibliográfico (libros y publicaciones especializadas).
- ✓ Antecedentes existentes en la división El Teniente.
- ✓ Ensayos realizados.
- ✓ Información obtenida en terreno.

2.1. Reseña Histórica.

El progreso en el campo de la tecnología del hormigón y del control de calidad, conjuntamente con los nuevos requerimientos de las estructuras, han conducido al desarrollo de hormigones de resistencias cada vez más elevadas.

Realizando una breve reseña histórica, se puede notar que en los principios del siglo XX el hormigón poseía una resistencia aproximada de 14 Mpa. En los años 30 este valor se había casi duplicado. Al comienzo de los años 50, un hormigón con resistencias a la compresión de 34 Mpa, era considerado de alta resistencia. En la década de los 60, hormigones de resistencia entre 41 y 52 Mpa, eran de uso comercial en EE.UU., al comienzo de los 70 se produjeron hormigones de 62 Mpa.

En los últimos 30 años se observa un desarrollo notable, tanto en lo que respecta a medios de producción y dosificación como al conocimiento más acabado de las características reológicas y propiedades mecánicas del hormigón.

Estos avances han permitido la obtención de propiedades mecánicas, trabajabilidad y durabilidad superiores a las habitualmente usadas en hormigones convencionales, Por ejemplo, hoy en día en EE.UU., ya se comercializan hormigones con una resistencia especificada de 100 Mpa.

Hay que reconocer que la definición de alta resistencia es una función de la región geográfica, en regiones donde se produce comercialmente hormigón de 60 Mpa, de resistencia a la compresión, alta resistencia podría estar en el rango de 80 a 100 Mpa.

Sin embargo en regiones donde el lote tope de resistencias para los hormigones comercializados sea de 50 Mpa, se podrá llamar hormigones de alta resistencia a uno de 70 Mpa de resistencia a la compresión.

2.2. Estado De La Norma En Chile.

La norma NCh 170 Of. 52, la cual estuvo vigente hasta el año 1985, clasificó a los hormigones de más alta resistencia como clase E, los cuales deberían tener una resistencia superior a los 30 Mpa.

El criterio utilizado en la actual norma difiere al criterio utilizado en la norma anterior, este último era “determinista”, mientras que el de la actual es un criterio “probabilista”. Tal diferencia implica, que la actual norma reconoce y acepta el valor esperado, en otras palabras, acepta que el hormigón puede fallar, o bien puede ocurrir que no siempre alcance el valor esperado. Tal criterio parece ser bastante más acertado y realista que el de la norma anterior, todos los que fabrican, controlan o trabajan con hormigón saben que por muy bien que este se fabrique o coloque, no siempre se obtiene el resultado esperado. La gran cantidad de variables que influyen en la determinación de la resistencia y el poco control que existe en algunos casos sobre alguna de ellas, hacen que los resultados obtenidos no correspondan a lo especificado. Es por lo tanto, esta “dispersión” la que en términos de probabilidad, acepta la norma actual NCh 170 Of. 85.

La norma antigua fue reemplazada el año 1985 por la NCh 170 Of. 85, la cual se puso en vigencia en diciembre del mismo año. Como todas las normas oficiales, esta ha sido declarada oficial de la Republica de Chile, según el decreto N°.404, del Ministerio de Obras Publicas, y reemplaza a las Normas NCh 170 Of. 52 y NCh 172 Of. 52.

En la actual norma los hormigones son clasificados hasta el grado H-50, para una resistencia a la compresión especificada $f_c = 50$ Mpa, medida en probeta cúbica de 200 mm. de arista, a la edad de 28 días.

La norma Chilena de Diseño y Cálculo de Hormigón Armado NCh 430, la cual esta basada en el código Norteamericano ACI 318 hace referencia a hormigones de hasta 35 Mpa de resistencia a la compresión medida en probeta cilíndrica de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura a 28 días e edad (esta denominación corresponde a un grado H40 aproximadamente en probeta

cúbica de 200 mm de arista)

2.3. Definición De Alta Resistencia.

El término “alta resistencia” es relativo, pues supone la obtención de resistencias superiores a las más altas obtenidas comúnmente. De esta manera, la clasificación de alta resistencia debe utilizarse para denominar los hormigones cuyo diseño y control deben utilizarse materiales y tecnologías especiales.

En Chile hoy en día, de acuerdo a la experiencia de los últimos años en hormigones en obra y en plantas de hormigón premezclados, se puede clasificar como hormigones de alta resistencia a aquellos cuya resistencia a la compresión a los 28 días es superior a 50 Mpa.

2.4. Factores Que Influyen En La Obtención De Altas Resistencias.

Para obtener hormigones de alta resistencia es necesario reestudiar y dar debida importancia a cada uno de los factores que intervienen en ellos, incluso en aquellos que en hormigones corrientes, se dejan generalmente de lado, por ser de poca significación.

El tipo de cemento y la razón agua/cemento, son entre los componentes del hormigón tradicional, los que siempre se tienen en cuenta, por que se da por hecho, que es la resistencia de la pasta, o la del mortero, el eslabón más débil del sistema, ya que la resistencia de los áridos, es casi siempre muy superior a aquellas.

En hormigones de alta resistencia la situación es diferente y por eso hay que preocuparse de la naturaleza de cada uno de sus componentes.

No se sabe cual es el límite máximo absoluto que puede alcanzar el hormigón, pero es un desafío siempre abierto perseguir el logro de resistencias cada vez más altas.

2.4.1. Cemento.

En los hormigones en general y en los de alta resistencia en particular, el empleo de dosis de cemento muy altas, suele conducir a la obtención de mezclas viscosas de poca trabajabilidad. En volúmenes importantes de hormigón hay que añadir el inconveniente adicional que supone la generación de un elevado calor de hidratación que puede inducir un proceso de fisuración térmica importante. Por lo anterior es práctica habitual de los hormigones de alta resistencia la sustitución de parte del cemento por una adición mineral que, además de minimizar los problemas señalados, mejora las características de resistencia y de durabilidad de dichos hormigones.

Para lograr “altas resistencias”, es recomendable restringir el uso de los cementos comerciales a aquellos carentes de adiciones, debido a que el propio hormigón de alta resistencia llevará un porcentaje de adición (microsílice), que necesita clínquer puro hidratado para reaccionar puzolánicamente, produciendo un incremento en la resistencia.

Por otro lado, si las condiciones de exposición del hormigón son agresivas (aguas ácidas–sulfatadas), se recomienda un cemento con adiciones (puzolanas), debido a que el deterioro del hormigón por ataques ácidos, se debe principalmente a la reacción entre estos agentes químicos y el hidróxido de calcio del cemento hidratado (cal liberada). Como se sabe la puzolana reacciona con parte de la cal liberada, por lo cual los hormigones con este tipo de cemento serían menos dañados, que en el caso del cemento Pórtland puro.

2.4.2. Áridos.

En los hormigones de alta resistencia, la unión entre el agregado y la pasta de cemento hidratada debe ser lo suficientemente resistente, como para permitir una importante transferencia de tensiones a través de la interfase “pasta-agregado”. A la vez, la resistencia de la fase pasta de cemento es muy alta, y algunas veces más alta que la resistencia de los propios áridos.

Observando la rotura de superficies en probetas en hormigones de alta resistencia, las grietas pasan tan a menudo, a través de las partículas de

agregado como a través de la misma pasta de cemento.

Esto indica que la resistencia de las partículas de agregado, es el factor limitante en la resistencia a la compresión del hormigón. Por lo tanto, las propiedades del agregado, especialmente la fracción gruesa, tiene considerable influencia en las propiedades de los hormigones de alta resistencia.

Uno de los temas corresponde al tamaño máximo del agregado grueso chancado, al disminuir el tamaño del árido grueso se consigue eliminar zonas potenciales de debilidad que provienen de la roca madre, es así como fracciones de partículas más pequeñas de agregado grueso son más resistentes que partículas más grandes.

Por otro lado, en estos hormigones, en los que la calidad de la pasta mejora, la rotura del hormigón se produce por falla de adherencia entre el árido y la pasta de cemento y se sabe que las tensiones de adherencia disminuyen al aumentar el área superficial del árido, o sea, al disminuir el tamaño máximo.

Consecuentemente se puede encontrar que para hormigones de alta resistencia con resistencia a la compresión entre 60 y 100 Mpa, el tamaño máximo del agregado grueso, a utilizar tiene que ser menor o igual a 20 mm. (3/4”).

En cuanto a la forma del agregado grueso, las gravas y gravillas de canto rodado son excelentes, el agregado chancado es igual de bueno siempre y cuando la forma de la partícula chancada sea la más parecida a un cubo, con un mínimo de partícula elongada y lajeada, de lo contrario se producirían efectos adversos en la trabajabilidad y resistencia.

La granulometría de los áridos tiene también, más importancia que en los hormigones corrientes, porque como la cantidad de cemento y de otros materiales finos aumenta para alcanzar las resistencias buscadas, el porcentaje de fino de los áridos tiene que ser disminuidos y el intervalo de variación de la banda granulométrica debe estrecharse.

2.4.3. Superplastificante.

Sin entrar en detalles de superficies cargadas eléctricamente, los superplastificantes producen defloculación en las partículas de cemento

fluidificando la mezcla, de modo que un muy bajo contenido de agua, es suficiente para una adecuada trabajabilidad. En consecuencia, es posible obtener mezclas con descenso de cono 180 a 200 mm. Con una razón de agua/cemento, dentro del rango del 0,2 a 0,3 (basado en agua libre de la mezcla).

La drástica reducción de agua en la mezcla produce una reducción en la distancia entre partículas de cemento. En consecuencia una muy densa matriz de cemento es formada a diferencia de un hormigón normal, incorporándose rápidamente los productos de hidratación del cemento. La virtud de esta matriz de alta densidad sumada a los enlaces químicos producidos por la hidratación, es lograr una muy alta resistencia a la compresión además de una muy baja porosidad.

2.4.4. Relación Agua/Cemento.

La relación agua/cemento es un factor muy importante para obtener hormigones de alta resistencia, ya que la resistencia del hormigón es inversamente proporcional a la razón agua/cemento, por lo que debemos tratar de obtener aquella mínima razón que nos permita una buena trabajabilidad considerando los demás componentes del hormigón.

La combinación de dos efectos, razón agua/cemento y la densidad de la matriz, permite que la razón agua/cemento influya sobre la resistencia solamente sobre un cierto valor mínimo de esta razón.

Por lo tanto, para cementos Pórtland y los superplastificantes disponibles, con los métodos usuales de mezclado y colocación, y las prácticas de curado, se ha encontrado que el valor óptimo de esta razón agua/cemento es cercano a 0,22. Para valores más altos que 0,22 existe influencia de la razón agua/cemento sobre la resistencia; valores más bajos son perjudiciales por que no se puede obtener en forma adecuada una alta densidad para la estructura de la pasta de cemento. (*High-Performance Concrete Demystified, 1996*)

2.4.5. Compatibilidad Cemento- Superplastificante.

El problema en esencia es que no todos los cementos Pórtland nacionales tienen el mismo comportamiento reológico cuando son usados con un determinado superplastificante a una baja razón agua/cemento.

Similarmente no todos los superplastificantes que cumplen con los estándares nacionales reaccionan en la misma forma con un determinado cemento Pórtland. Por lo tanto se debe de entender que no todos los cementos son compatibles con todas las mezclas, y en el caso de los hormigones de alta resistencia el problema de la compatibilidad cemento-superplastificante es mucho mayor.

Estudios en la interacción entre cemento y superplastificante conducidos en la universidad de Sherbrooke han identificado el factor importante en su compatibilidad.

Para el cemento son importantes los contenidos de C3A C4AF, la reactividad del C3A (depende de su forma morfológica y del grado de sulfurización del clínquer), el contenido del sulfato de calcio y la forma final del sulfato de calcio en el cemento base.

Para el superplastificante, los factores importantes son la longitud de la cadena molecular, la posición del grupo sulfonato en la cadena, y la presencia de sulfonatos residuales, los cuales afectan las propiedades de defloculación del cemento.

Sobre la base de estos factores, los investigadores postulan un cemento ideal para hormigones de alta resistencia, desde un punto de vista del comportamiento reológico: de molienda no muy fina, con muy bajo contenido de C3A, y con una fase intersticial cuya reactividad es fácilmente controlada por los iones sulfatos derivados desde la solución de los sulfatos presentes en el cemento.

2.4.6. Adiciones Al Cemento.

En su forma básica, el hormigón es una mezcla de cemento Pórtland, arena, árido y agua. El principal material cementante en el hormigón es el cemento Pórtland. Hoy en día la mayoría de las mezclas de hormigón contienen adiciones al cemento que constituyen una porción del material cementante en el hormigón. Estos materiales son generalmente subproductos de otros procesos o materiales de origen natural. Ellos pueden o no ser procesados antes de ser utilizados en los hormigones. Algunos de estos materiales son denominados puzolanas, debido a que, por si mismos, no tienen propiedades cementantes, pero cuando se utilizan con el cemento Pórtland, reaccionan para formar componentes cementantes. Otros materiales, como la escoria si exhiben propiedades cementantes.

Para su uso en el hormigón, las adiciones al cemento necesitan cumplir con los requerimientos de las normas establecidas.

A continuación se observan algunos ejemplos de estos materiales.

2.4.6.1. Cenizas volantes.

Son un subproducto de los hornos que se emplean en el carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en sí, las partículas no combustibles removidas de la chimenea de gases. La cantidad de ceniza volante en el hormigón puede variar entre un 5 y el 65% en peso de los materiales cementantes, según la fuente y la composición de la ceniza volante y el desempeño requerido del hormigón. Las características de las cenizas volantes pueden variar significativamente según la fuente del carbón mineral que se quema. Las cenizas de clase F son normalmente producidas de la quema de la antracita o de carbones bituminosos y generalmente poseen un contenido bajo de calcio. Las cenizas de clase C son producidas cuando se queman carbones sub-bituminosos y poseen típicamente propiedades puzolánicas.

2.4.6.2. Escorias molidas de alto horno.

Son subproductos no metálicos producidos en un alto horno, cuando el mineral de hierro es reducido a hierro dulce. La escoria líquida es enfriada rápidamente para formar gránulos, que son molidos hasta una finura similar a la del cemento Pórtland. Las escorias molidas de alto horno tienen por sí mismas propiedades cementantes pero estas son mejoradas cuando se utilizan con cemento Pórtland.

2.4.6.3. Humo de sílice.

Es un material puzolánico de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silíceo o ferro-silíceo. Se recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico. El humo de sílice es un polvo extremadamente fino, con partículas alrededor de 100 veces más pequeñas que un grano promedio de cemento. El humo de sílice está disponible generalmente como un polvo densificado. Generalmente se utiliza entre el 5 y el 12% en peso de los materiales cementantes para las estructuras de hormigón que necesitan altas resistencias o una permeabilidad significativamente reducida al agua. Debido a su extrema finura, deberán garantizarse procedimientos especiales para su manipulación, el vaciado y curado del hormigón con este material.

2.4.6.4. Puzolanas naturales.

Varios materiales naturales poseen, o pueden ser procesados para poseer propiedades puzolánicas. Las puzolanas naturales tienen generalmente un origen volcánico, estos materiales silíceos tienden a ser reactivos si son enfriados rápidamente. En los Estados Unidos las puzolanas naturales comercialmente disponibles incluyen el *Metacaolín* y las *Arcillas* o *esquistos calcinados*. Estos materiales son producidos mediante la calcinación controlada de minerales de origen natural. El Metacaolín es producido a partir de arcillas, caolinífticas relativamente puras y se emplean entre un 15 y un 20 % en peso de los materiales cementantes. Las arcillas y los esquistos calcinados son utilizados a mayores porcentajes en peso. Otras puzolanas naturales son los

cristales volcánicos, zeolíticos, cenizas de cáscara de arroz y tierra de diatomeas.

2.4.6.5. Utilización de adiciones al cemento.

Pueden ser utilizados para mejorar el desempeño del hormigón en estado fresco y endurecido. Son principalmente utilizados para mejorar la trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia. Estos materiales le permiten al productor de hormigón diseñar y modificar la mezcla, para satisfacer la aplicación deseada. Las mezclas de hormigón con elevados contenidos de cemento Pórtland son susceptibles a fisuración y a una mayor generación de calor. Estos efectos pueden ser controlados en alguna medida mediante la utilización de adiciones al cemento.

Los materiales cementantes suplementarios tales como las cenizas volantes, las escorias y el humo de sílice le permiten a la industria del concreto utilizar centenares de millones de toneladas de subproductos, de otra forma serían vertidos en el terreno como desechos. Por otro lado su utilización reduce el consumo de cemento Pórtland por unidad de volumen de hormigón. El cemento Pórtland tiene un elevado consumo de energía y de emisiones asociadas con su producción. Este consumo energético se disminuye cuando se reduce la cantidad de cemento Pórtland utilizado en el hormigón.

2.4.7. Propiedades Del Hormigón Con Adiciones.

En general las adiciones al cemento mejoran la consistencia y trabajabilidad del hormigón fresco, por que se le añade un volumen adicional de finos a la mezcla. El hormigón con humo de sílice es utilizado típicamente con bajos contenidos de agua, con aditivos reductores de agua de alto rango y estas mezclas tienden a ser cohesivas y más viscosas que el hormigón corriente. Las cenizas volantes y las escorias generalmente reducen la demanda de agua para el asentamiento requerido del hormigón. El tiempo de fraguado del hormigón puede ser retardado, con algunas adiciones, utilizadas en porcentajes elevados. Estos pueden ser beneficiosos en climas calientes. El retardado es eliminado en invierno reduciendo el porcentaje de las adiciones al cemento en el hormigón.

Debido a los finos adicionales, la cantidad y la tasa de exudación en estos hormigones es frecuentemente baja esto es especialmente significativo cuando se utiliza humo de sílice. Una exudación baja, conjuntamente con el retardado del fraguado puede causar fisuración por retracción plástica y por esto se pueden hacer necesarias algunas precauciones especiales durante el vaciado y el acabado.

2.4.7.1. Resistencias.

Las mezclas de hormigón pueden ser dosificadas para producir las resistencias requeridas y la velocidad de ganancia de resistencia que sea requerida para la aplicación. Con las adiciones que no sean humo de sílice, la velocidad de ganancia de resistencia puede ser mas baja inicialmente, pero la ganancia de resistencia es continua por un periodo de tiempo mas largo comparado con las mezclas que solo poseen cemento Pórtland, lo que frecuentemente da como resultado resistencias últimas mas elevadas.

El hormigón que contiene adiciones generalmente necesita consideraciones adicionales para el curado de la estructura para asegurar que sean alcanzadas las propiedades esperadas.

2.4.7.2. Durabilidad.

Las adiciones al cemento pueden ser utilizadas para reducir el calor asociado con la hidratación del cemento y reducir el potencial de fisuración térmica en elementos estructurales masivos. Estos materiales modifican la micro-estructura del hormigón y reducen su permeabilidad por lo que consecuentemente reducen la penetración de aguas y sales disueltas en el hormigón. La impermeabilidad del hormigón reducirá varias formas de deterioro del mismo, tales como la corrosión del acero de refuerzo y el ataque de químicos. Las mayorías de las adiciones al cemento reducen la expansión interna del hormigón debido a reacciones químicas tales como la reacción árido álcali y ataques de sulfatos. La combinación óptima de materiales varía para diferentes requisitos de desempeño y para el tipo de adición.

Capítulo III

NECESIDAD DE ALTAS RESISTENCIAS EN LA MINA EL TENIENTE

3.1. Hormigones En La Minería.

El principal uso, que se le da a los hormigones en la minería, es para confeccionar obras de pavimentación (carpetas de hormigón), pero realizar este tipo de obras en el interior de una mina subterránea, puede parecer en principio innecesario o poco rentable, esto es debido a que:

En primer lugar, el suelo rocoso proporciona una excelente base de apoyo, y realizando algunos trabajos de nivelación, se podrían obtener una carpeta de rodado aceptable para los vehículos mineros.

En segundo lugar, el tiempo promedio que toma la exploración de un sector de producción minero oscila aproximadamente entre 5 a 6 años, tiempo de vida útil extremadamente corto comparado con la de los pavimentos carreteros que es aproximadamente de 20 años en el caso del hormigón.

De acuerdo a lo expuesto podría pensarse que el beneficio a obtener no es tan grande, sin embargo, hay que tener en cuenta algunos aspectos como: la metodología empleada en la extracción del mineral, tipo de equipo utilizado en el transporte y cargío del mineral, costos por la mantención y reparación de los equipos LHD, perdidas de rendimiento en equipos y en el personal por condiciones de trabajo deficiente.

Además se deben tener en cuenta algunas limitaciones en el interior de la mina.

- ✓ *Espacios reducidos:* Las galerías de una mina subterránea son de forma abovedada y sus dimensiones responden a los métodos de extracción y tipo de equipo utilizado, por esta razón, el espacio disponible en la mina, no es el más adecuado para realizar obras de pavimentación con equipos tradicionales.

- ✓ *Tiempo de construcción limitado (sectores en producción):* La ejecución de las obras de hormigonado interrumpen las faenas propias de la mina, lo cual tiene un costo asociado a la pérdida de eficiencia en la producción, por eso, el tiempo de postura del hormigón debe ser el menor posible.
- ✓ *Condiciones agresivas para el hormigón:* Si se producen infiltraciones de agua en el interior de la mina, dependiendo del volumen de escurrimiento, pueden producirse algunos problemas, tales como la socavación de bases de apoyo de la carpeta, formación de sustancias químicas como sulfatos, ácidos, cloruros, etc. que pueden ser altamente dañinas para el hormigón.
- ✓ *Falta de iluminación natural:* Por tratarse de una mina subterránea, la ejecución de las posturas de hormigón, deben llevarse a cabo con el auxilio de luz artificial, lo cual también introducen dificultades a los trabajos de construcción.
- ✓ *Cargas de diseño:* En el caso de los equipos de minería, estructuralmente fuertes y con una capacidad de carga relativamente grande, las cargas de diseño son bastante superiores a las normalmente consideradas para otros hormigones.

3.2. Planteamiento Específico Para La Mina “El Teniente”.

En el caso específico de la mina El Teniente de CODELCO-Chile, tenemos presente todos los aspectos anteriormente mencionados. Ahora cabe detallar las condiciones propias de este mineral, para esto se describen los siguientes aspectos.

- ✓ *Forma y dimensiones de las galerías:* La forma o desarrollo de un sector LHD, está caracterizado por galerías o calles, que van aproximadamente en dirección Norte-Sur, estas calles son atravesadas con un cierto esviaje, por otras galerías inferiores llamadas “zanjas”. Tanto las calles como las zanjás tienen formas abovedadas. (Ver figuras N°1 y N°2)

- ✓ *Método de explotación en nivel LHD:* El método de explotación o extracción del mineral en los niveles LHD, se llama “Extracción por Hundimiento” o “Sistema LHD” y consiste en el hundimiento de bloque de roca mediante explosivos desde un nivel superior o “Nivel de Hundimiento”, hacia un nivel de extracción o “Nivel LHD”, en este último la roca fracturada, es recogida por los LHD en los puntos de extracción ubicados en las zanjás; desde aquí es transportada hacia los puntos de vaciado. Estos son perforaciones o “Piques”, que conectan el nivel de extracción con un nivel donde circula un ferrocarril “metalero” (nivel de transporte). Este transporta el mineral hacia la superficie u otro nivel inferior de la mina.

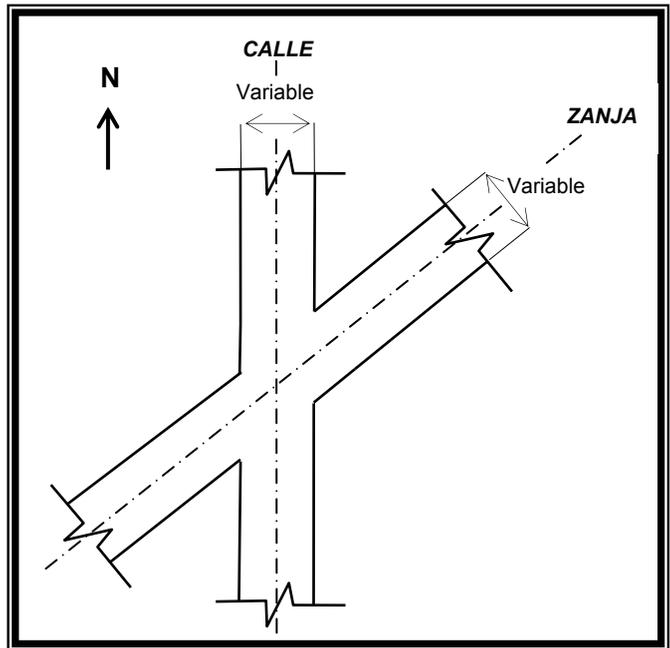


Figura 1. Forma y dimensiones de las galerías

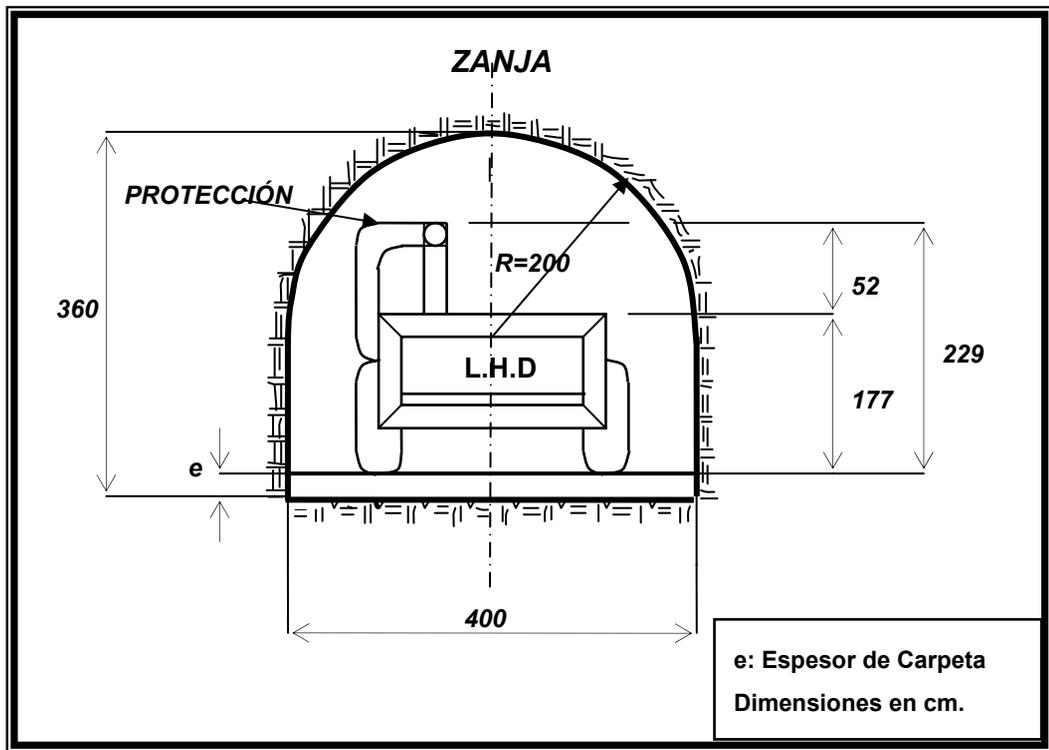


Figura 2. Corte transversal de una zanja.

3.2.1. Solicitaciones producidas por el LHD a la carpeta de hormigón.

Las solicitaciones que actúan sobre las carpetas de hormigón en el interior de la mina, se pueden separar en: cargas inherentes al tránsito del vehículo LHD, cargas de impacto y cargas abrasivas.

El LHD, es una especie de cargador frontal, diseñado especialmente para la minería, llamado también SCOOPTRAM o LHD. (Load, Haul, Dump; cargó, transporte y vaciado). En la división El Teniente uno de los equipos más utilizados es el "PUMA TEN 8000 E" estos equipos cargados pesan 26 toneladas, en su eje delantero; cargas que se distribuye en dos ruedas neumáticas con 70 p.s.i. de presión de inflado. Siendo la capacidad máxima de cargó de 8,82 Ton. por viaje o baldada. El LHD "PUMA TEN 8000 E", versión eléctrica, más pesado existente actualmente en la división, tiene la siguiente configuración de cargas.

EJE	VACIO	CARGADO
Delantero	11.700 Kg.	25.400 Kg.
Trasero	14.080 Kg.	9.200 Kg.

Tabla N°1. Configuración de cargas LHD.

Para el LHD "PUMA", la distancia entre ruedas, medida entre ejes, es de 1980 mm (78"), y la presión de inflado es igual para los cuatro neumáticos y tiene un valor de 70 p.s.i. (4,92 Kg. /cm²).

Las cargas debidas al tránsito del LHD producen en el pavimento esfuerzos de compresión, tracción, flexión, etc. además de estas solicitaciones típicas, el pavimento se encuentra sometido a cargas de impacto debido a que habitualmente se baja la pala o balde del equipo. Un tercer tipo de solicitación, quizás el más importante, es la abrasión a que se encuentra sometida la carpeta, el LHD, al transportar el mineral derrama parte de él, sobre el

pavimento, este al ser aplastado por las ruedas al doblar, produce una fuerte abrasión sobre la superficie.

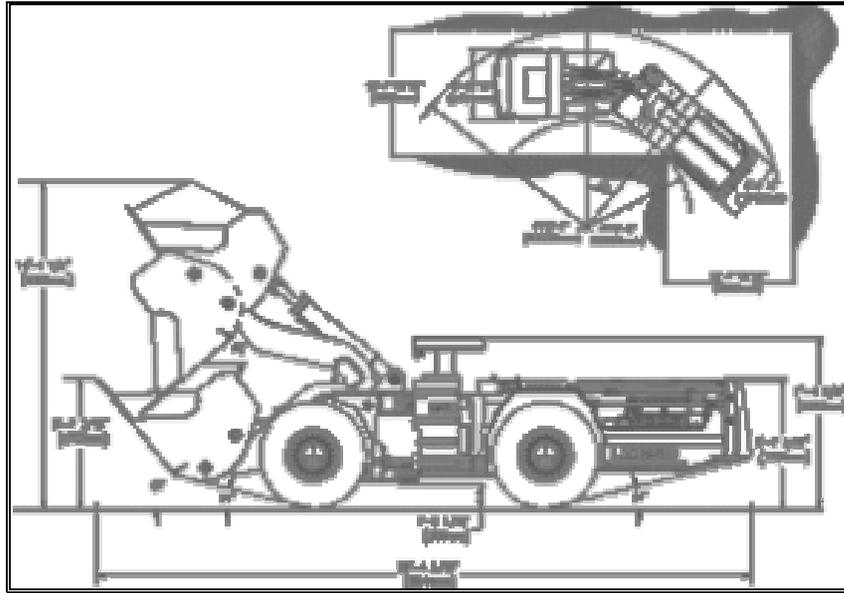


Figura 3. Esquema del equipo LHD.



Fotografía N°1 Empuje de equipo LHD sobre frontón de rocas.

Mas aún al cargar el mineral, el LHD desarrolla su máxima potencia, empujando contra un verdadero frontón de rocas haciendo que las ruedas del equipo

patinen considerablemente, sometiendo a la superficie de la carpeta a un enorme desgaste por abrasión.

3.3. Experiencia Sobre Pavimentos En La Mina De Cobre El Teniente.

En la mina El Teniente, encontramos una variada gama de intentos de solucionar el problema de las carpetas de hormigón en los sectores de producción, la cual nos proporciona bastante información para ser analizada.

3.3.1. Análisis del comportamiento de las carpetas en el sector Fortuna.

La división realizó una investigación para estudiar, el tipo de daño, sus causas, localización y las variables que intervienen en el problema, todo esto con el objeto de obtener conclusiones que permitan, mejorar el diseño de las carpetas.

El estudio realizado, se dividió en tres partes:

- i) Campaña de terreno
- ii) Análisis de la información obtenida y
- iii) Estudio de los hormigones de las carpetas de rodado del sector Fortuna, mediante la extracción de testigos realizada por el Instituto de Investigación y Ensaye de Materiales (IDIEM) de la Universidad de Chile.

La campaña de terreno consistió, en la realización de un catastro de los daños en la totalidad de las calles pavimentadas (#8, #9, #10, #11, #12, #13, #14) del sector Fortuna.

Este catastro contempló la cuantificación del área y la profundidad de las zonas dañadas, su ubicación y las condiciones ambientales presentes en el lugar.

Se presentan las principales observaciones derivadas de la investigación en el sector Fortuna, este análisis se realizó aproximadamente después de un año de la puesta en servicio de estas carpetas.

1. Los daños producidos en los pavimentos analizados corresponden a la erosión de las carpetas debido principalmente a la acción abrasiva de los neumáticos del LHD.
2. El deterioro, (erosión por abrasión), es mayor en las zonas caracterizadas por alta presencia de agua que en las de baja, esto indica claramente que el agua ácida tiene gran influencia en el daño producido.
3. Los daños producidos son focalizados, presentándose casi en su totalidad, en las zonas de cargío del mineral, esto es, en la zona de intersección calle-zanja, dentro de esta zona la erosión se produce generalmente en dos sectores, en las curvas de mayor velocidad (mayor radio), que es la zona por donde el LHD ingresa a la zanja o punto de extracción y en la entrada de la zanja misma. Este último, corresponde al lugar donde el equipo desarrolla su máxima potencia al cargar el mineral, produciendo el severo patinaje de sus ruedas.
4. Se aprecia un ahuellamiento generalizado de las carpetas de rodadura, enfatizado en los sectores con alta presencia de agua, en los cuales la mayoría de los hormigones presentan áridos a la vista. Esto indicaría que la resistencia superficial de las carpetas de hormigón, no serían del nivel requerido para el tipo de tránsito y condiciones ambientales presentes.

En forma paralela el estudio encargado al IDIEM de la Universidad de Chile, arrojó las siguientes conclusiones.

- ✓ De estudios realizados por especialistas en la materia, sobre el problema de saneamiento de aguas presente en las calles de producción de la mina, se puede concluir que no existe una solución característica, sencilla, económica y generalizable que permita eliminar la abundante agua infiltrada. Por este motivo el diseño de las carpetas de hormigón debe contemplar la presencia permanente de esta.
- ✓ El deterioro en los pavimentos de hormigones del sector Fortuna, está ligado principalmente al escurrimiento de aguas ácidas, con alto contenido de sulfatos en contacto con la carpeta.

Se considera (según la NCh 170 Of. 85.) que la agresividad por sulfato al hormigón es "Severa" para concentraciones de sulfatos que se encuentren

entre 1.500 y 10.000 mg./l de SO₄, dos muestras de agua tomadas en el sector arrojaron un promedio de 5974 mg./l.

Como se ve, las carpetas de hormigón, están expuestas a un ambiente notoriamente agresivo.

3.3.2. Drenaje o saneamiento de las aguas presentes.

Como se ha mencionado, el saneamiento de las calles de producción, constituye un problema de difícil solución, la única forma de hacerlo y estudios realizados al respecto así lo indican, es mediante lo que se llama un “Tiro de Sondaje”, esto es perforaciones que evacuen el agua hacia los niveles inferiores, el problema radica en el alto costo de estos.

Como conclusión se tiene que, si no es posible eliminar el agua por métodos tradicionales (pendientes, drenes, etc.) la presencia de ésta, debe considerarse en el diseño del pavimento de hormigón.

3.4. Las Aguas Ácidas En La Mina Y Su Influencia Sobre El Hormigón.

Como se ha mencionado, un problema importante en los pavimentos de hormigón, es la presencia de las aguas químicamente agresivas en los sectores de producción en la mina El Teniente.

Dos muestras de agua tomadas en el sector Fortuna del Teniente 4, mostraron la siguiente composición.

Parámetro	Muestra #1	Muestra #2	Promedio
PH a 20°C	4,9	2,9	3,9
Cloruros (Cl.-) en mg/l	71	1.914	993
Sulfatos (SO ₄) en mg/l	2.217	9.730	5.974

Tabla N°2. Muestras de aguas agresivas sector Fortuna.

Se observan fuertes discrepancias entre los valores de ambas muestras. La explicación posible es que la muestra #2 fue tomada en un sector más cercano a la superficie por lo que los valores más altos, con respecto a la muestra #1 se deberían a una mayor tasa de infiltración de aguas superficiales (lluvia y nieve).

Sin embargo, ambas muestras muestran una condición “Severa” de exposición a sulfatos, según la norma NCh 170 Of. 85.

3.4.1. Ataque ácido en el hormigón.

El deterioro del hormigón por ataques ácidos, se debe principalmente a la reacción entre estos agentes químicos y el hidróxido de calcio del cemento hidratado (cal liberada), si se utilizan áridos calizos, éstos también están sujetos al ataque de ácidos. En muchos casos, los productos de la reacción química son compuestos solubles en agua, los cuales son removidos o lavados por la acción de esta.

Cabe hacer notar que en Chile existen cementos puzolánicos (cemento con adición de puzolanas), como se sabe la puzolana reacciona con parte de la cal liberada, por lo cual los hormigones con este tipo de cemento serían menos dañados, que en el caso del cemento Pórtland puro.

En el caso particular del ácido sulfúrico (presente en la mina) se produce un efecto adicional, o aceleramiento del deterioro del hormigón. En presencia de este ácido, tiene lugar la formación de sulfato de calcio, el cual también ataca el hormigón.

Un estudio realizado en Estados Unidos, sobre la influencia de la lluvia ácida en las estructuras de hormigón (*ACI Materials Journal / Marzo-Abril 1987*) arrojó importantes conclusiones al respecto.

Se concluyó de este programa de investigación, que la lluvia ácida (agua ácida en contacto con el hormigón) producen deterioros medibles en los hormigones de cemento Pórtland.

Como posible solución para el problema del ataque ácido al hormigón, se estima que un hormigón denso, impermeable y con una baja relación agua/cemento puede proporcionar un grado aceptable de protección para un ataque ácido relativamente suave. Otra forma es recurrir a recubrimientos de materiales especiales que soporten el ataque ácido.

3.4.2. Ataque por sulfato al hormigón.

Como plantean algunos autores, aparentemente hay dos reacciones químicas involucradas en el ataque por sulfato al hormigón, estas son:

1. La combinación de sulfatos con el hidróxido de calcio liberado (cal liberada) durante la hidratación del cemento da lugar al sulfato de calcio (yeso).
2. La mezcla del sulfato de calcio y el aluminato de calcio hidratado (aluminato tricálcico) producto de la hidratación del cemento da lugar a la formación del sulfoaluminato de calcio (Etringita).

Estas dos reacciones producen un aumento del volumen sólido del hormigón, la segunda es la responsable generalmente de las expansiones y rompimientos que sufren los hormigones a causa de las soluciones sulfatadas.

Por otro lado existe una buena correlación entre la resistencia a los sulfatos de los cementos y su contenido de aluminato tricálcico (elemento constituyente del clínquer), a menor contenido de aluminato tricálcico, mayor resistencia a los sulfatos.

Algunos estudios han mostrado que ciertas puzolanas adicionadas al cemento Pórtland en proporciones del 15 al 20%, aumentan las expectativas considerablemente del hormigón expuestos a sulfatos (los cementos puzolánicos chilenos tienen entre 30 y 50 % de adición)

En general la protección del hormigón contra el ataque de los sulfatos, se logra fundamentalmente con una alta calidad en la fabricación del hormigón, alta densidad, homogeneidad, una baja relación agua/cemento, y con el empleo de cementos adecuados.

La norma Chilena NCh 170 Of. 85. en su Anexo G “Recomendaciones para Ambientes Agresivos” estima los siguientes grados de ataque según la concentración de sulfatos.

Exposiciones a Sulfato	Sulfatos (SO₄) en Agua, ppm.
Insignificantes	0-150
Moderada	150-1.500
Severa	1.500-10.000
Muy Severa	Sobre 10.000

Tabla N°3. Grado de ataque según la exposición de sulfatos (NCh 170 Of. 85).

De acuerdo a la muestra promedio obtenida en la mina (5.974 ppm. de SO₄), se puede apreciar, que las aguas ácidas presentes en la mina “El Teniente” corresponden a una condición “Severa”, es decir a un ambiente altamente agresivo para el hormigón.

3.5. El Hormigón Y Su Resistencia A La Abrasión.

Se define la resistencia a la abrasión como: “La habilidad de la superficie para resistir el desgaste por fricción”.

La resistencia a la abrasión del hormigón depende principalmente de:

1. Resistencia a la compresión.
2. Propiedades de los agregados.
3. Métodos de terminación superficial.
4. Uso de recubrimientos.
5. Curado de la superficie.

Numerosos estudios realizados, muestran que la resistencia a la compresión del hormigón es el factor más importante en la capacidad del hormigón para soportar el desgaste. A mayor resistencia a la compresión se obtiene mayor resistencia a la abrasión.

Se sabe que ambas resistencias varían inversamente con la razón de huecos en el hormigón. En efecto, para una mezcla rica, con limitaciones de tamaño máximo en el agregado, se consigue una buena resistencia a la compresión lo cual redundará en una buena resistencia a la abrasión de la superficie del hormigón.

Otro factor importante en la resistencia a la abrasión de la superficie del hormigón, es la resistencia de los agregados grueso y fino.

Como un medio para mejorar la resistencia de la superficie a la abrasión se puede aplicar sobre esta un riego seco de cemento con arena dura o cemento con partículas de hierro, otro medio es recurrir a materiales especiales, tal como recubrimientos de alta resistencia (epóxicos).

El curado tiene gran influencia en la resistencia a la abrasión de la superficie, se ha visto que una superficie curada durante 7 días, es casi doblemente resistente al desgaste que una curada durante 3 días, es decir, un curado adicional, redundará en un amplio mejoramiento.

3.6. Análisis De Algunos De Los Pavimentos Utilizados En La Mina.

En la mina El Teniente, se ha utilizado varios tipos de pavimentos, para la confección de las carpetas de rodado en los niveles de producción, a continuación se realiza un análisis del comportamiento que han tenido algunos de ellos.

3.6.1. Pavimento de grava o estabilizado compactado.

Este tipo de pavimento consiste en una carpeta de rodado confeccionada con material granular grueso seleccionado, estabilizada y compactada, el material proviene del exterior o de los desarrollos (excavación de las galerías) de la mina. En general este tipo de carpetas requiere mantención periódica y solo funciona en zonas secas o de muy poca agua, como es el caso de los caminos de acceso a superficies o rampas de enlace entre los diferentes niveles y sub-niveles de la mina. En las zonas con abundante infiltración de agua, como es el caso de los niveles de producción LHD, la formación de barro y aposamiento de agua deja inoperante la carpeta de rodado, con el consiguiente daño que sufren los equipos LHD, en su sistema hidromecánico, por los golpes y las características químicas agresivas del agua y el barro. Como se puede ver, este tipo de carpeta, no es buena solución para las calles de producción, ya que por las condiciones descritas, se requiere estar permanentemente ejecutando labores de conservación, lo cual entorpece seriamente las labores de producción.

3.6.2. Pavimento de roca nivelada.

Este tipo de pavimento consiste sencillamente en utilizar la superficie del piso de la galería, emparejada con marina (material proveniente de los desarrollos) en las partes en que la depresión es muy fuerte. Esta solución es la más económica, sin embargo, dada la tremenda irregularidad y dureza de la superficie, las condiciones de rodadura son pésimas. Esto causa daños al

equipo, sobre todo a sus neumáticos y malas condiciones de trabajo para el operador. Este tipo de pavimento se utiliza en algunos sectores de producción LHD, como es obvio, existen fundadas razones para desecharlo.

3.6.3. Pavimento articulado o de bloque de hormigón

En la búsqueda de una solución a las carpetas de rodado cuyo tiempo de postura en servicio sea el mínimo, ya sea por que se requiere para un sector que esta en producción o para un sector en desarrollo en el cual la programación de la mina así lo requiera, se construyo un paño de prueba con bloques de hormigón. Según los antecedentes obtenidos, este tipo de hormigón no dio resultado por las siguientes razones.

- Los bloques fueron confeccionados con hormigones de resistencias relativamente bajas para los niveles y tipos de solicitaciones.
- El hormigón fue atacado rápidamente por la acción de aguas químicas agresivas debido a la alta porosidad del hormigón corriente.
- El poder de trabazón entre los bloques, condición fundamental para este tipo de pavimentos, se perdió rápidamente debido a la alta presencia de agua.

Si bien la resistencia y la impermeabilidad del hormigón son susceptibles a mejorar, empleando aditivos, adiciones y procedimientos especiales. El verdadero problema para el pavimento articulado reside en que, dadas las altas cargas abrasivas (patinaje de las ruedas del LHD) junto con la presencia de agua, es imposible mantener los bloques confinados en su sitio. Es decir, en la práctica lo que sucede, es que bajo el paso de las ruedas del LHD, los bloques comienzan a levantarse y son arrancados por la pala del equipo, la cual al momento de cargar el mineral va ras al piso.

3.6.4. Pavimento de asfalto.

La obra consiste en la construcción de una base de material granular, tal que permita nivelar las irregularidades propias del piso de roca, sobre esta base o carpeta nivelada se dispusieron mantas geotectíles, las cuales cumplieron la

función de uniformar la capacidad de soporte de la base y al mismo tiempo evitar el socavamiento de esta, por la acción de las abundantes aguas infiltradas. Sobre las mantas de geotextiles se construyo una carpeta asfáltica con mezcla de planta en caliente y cuyo espesor terminado fue de catorce centímetros.

Según antecedentes disponibles sobre el comportamiento de este pavimento, se ha podido observar que no tiene problemas con la presencia de agua químicamente agresiva, sin embargo, después de cuatro meses de su puesta en servicio, si presenta problemas serios de desgaste, por la acción abrasiva de las ruedas del LHD. Aun más, en las zonas de cargío o puntos de extracción, fue necesario efectuar un recapado de la carpeta asfáltica debido al acelerado proceso de desgaste que se produce en dichas zonas.

Se han realizado carpetas con asfalto modificado con elastómeros. En la opinión de los responsables (Unidad de carretera- Depto. Construcción y mantención), este material tiene un comportamiento bastante superior al asfalto tradicional en lo que se refiere a la abrasión, sin embargo, necesita mantención constantemente.

De acuerdo con lo manifestado, este pavimento podría ser una solución al problema, por su inmunidad frente al ataque de químicos, de las aguas de la mina, pero por otro lado, requiere una constante mantención, si pensamos que para realizar estas faenas de conservación, es necesario contar con maquinaria, la cual junto con el asfalto deben ser traídos desde el exterior de la mina, además del hecho, que la mina trabaja fundamentalmente con hormigón y para lo cual cuenta incluso con plantas en el interior de la mina, esta solución pierde inmediatamente su atractivo. Además, al igual que los otros pavimentos mencionados, la mantención que requiere afecta la eficiencia del proceso productivo.

3.6.5. Pavimentos de hormigón (Cemento hidráulico).

El diseño realizado contempló la colocación de una sub-base granular de 15 centímetros de espesor, salvo en partes en que por razones constructivas, tal como la imposibilidad de eliminar el abundante agua presente, ésta se reemplazo por un emplantillado de hormigón de 170 kilos de cemento por metro cúbico. Sobre esta sub-base se colocó una carpeta de hormigón con resistencia a la compresión especificada a los 28 días de 300 kg/cm² y cuyo espesor fue de 22 centímetros.

3.6.6. Observaciones.

De los diferentes tipos de pavimentos implementados en la mina El Teniente, (roca, grava, asfalto, hormigones, etc.), los de hormigón son los que han presentado mejor comportamiento frente a las condiciones imperantes, si bien las carpetas han sufrido algún deterioro, este no ha sido global.

Las fallas presentadas por las carpetas, se producen por erosión de la carpeta de rodado, debido a la acción combinada del tránsito abrasivo y el ataque químico de las aguas ácidas-sulfatadas presentes en el lugar.

El proceso de erosión no es uniforme, produciéndose un desgaste inicial de la capa superficial, tanto en sectores altamente solicitados como en sectores con bajo número de pasadas de LHD. Esto se debe al debilitamiento de la superficie por la acción agresiva de las aguas ácidas- sulfatadas. Por otro lado se observó que la profundización del desgaste fue haciéndose gradualmente más lenta en la medida, que la erosión dejaba al descubierto los áridos, los cuales tienen mejor resistencia que la pasta de cemento.

El grado de erosión es notoriamente mayor en los sectores caracterizados por la presencia de abundante agua que en las zonas secas y levemente húmedas.

El saneamiento de las aguas presentes en las calles de producción, constituye un problema que no tiene solución sencilla y económica, principalmente por dos aspectos, solo se puede evacuar el agua hacia los niveles inferiores mediante

“Tiros de Sondajes” lo cual es bastante caro. Por otro lado para captar las aguas se requieren colectores y cunetas, lo que introduce un problema en el cruce de las calles con las zanjas, ya que es aquí donde el LHD carga el mineral, produciendo en la carpeta las mayores sollicitaciones. De aquí se concluye que la presencia permanente del agua agresiva sobre el pavimento debe formar parte del diseño de este.

3.7. Carpeta de Hormigón de Alta Resistencia.

La conclusión global del análisis realizado sobre la experiencia de pavimentos sobre las calles de producción LHD existentes en la mina “El Teniente”, es que la solución debe ser un pavimento de hormigón, dotado de una muy buena impermeabilidad y una sobresaliente resistencia a la abrasión. Estas características son indispensables para que la carpeta de rodado soporte tanto el ataque químico de las aguas agresivas ácidas-sulfatadas, como la acción altamente agresiva del tránsito permanente.

Para conseguir estas características en el hormigón es necesaria la utilización de alguna adición, que mejore sustancialmente sus propiedades, de esta forma, durante muchos años en la división El Teniente, se utilizó la microsílíce en polvo. Sin dar muchos antecedentes, (los que serán tratados en el capítulo siguiente) se trata de un material puzolánico, que agregado al cemento puede producir hormigones de alta resistencia.

La microsílíce, el humo de sílice o sílica fume se conoce desde hace cincuenta años en el mundo, por las renombradas propiedades que le ocasiona al hormigón: mayor resistencia, menor permeabilidad, mayor resistencia al ataque de ácidos y sulfatos.

Capítulo IV

HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA “H-70” EN LA DIVISIÓN EL TENIENTE

4.1. Introducción.

En la búsqueda de obtener la solución más adecuada para las carpetas de hormigón, se han implementado diferentes soluciones en la división El Teniente. Una de ellas, consistió en el diseño de una carpeta de hormigón con resistencia especificada a los 28 días de 50 Mpa (500 kg/cm²).

Para lograr estos niveles de resistencia sin incurrir en elementos especiales (adiciones), deben utilizarse dosis de cemento muy altas, y una muy baja relación agua/cemento, lo anterior obliga a utilizar aditivos reductores de agua o superplastificantes y un muy buen control durante el proceso de endurecimiento del hormigón.

El problema de este diseño, es que la carpeta no tiene la impermeabilidad deseada para enfrentar el ataque de las aguas ácidas, el alto contenido de cemento necesario, es perjudicial frente a la presencia de aguas ácidas y sulfatadas debido a la gran cantidad de hidróxido de calcio que libera el hormigón durante el proceso de hidratación del cemento, en definitiva esta solución, no es la más indicada ya que la carpeta se deteriora rápidamente frente al ataque de las aguas agresivas. En cuanto a su resistencia, las altas sollicitaciones producidas por el trabajo del LHD deterioran la carpeta considerablemente.

Para enfrentar estos problemas, es necesaria la utilización de un hormigón de alta resistencia mecánica (70 Mpa), por encima de los valores usuales. La microsílíce incorporada produce aumentos no solo de resistencias. Sin no como veremos, mejora la integridad del hormigón haciéndolo altamente impermeable, denso y homogéneo.

En la actualidad las normas chilenas están referidas hasta hormigones de 50 Mpa. o sea 500 kg/cm² de resistencia a las 28 días, desde esta resistencia en

adelante, no hay nada escrito o referenciado.

Para los hormigones de alta resistencia H-70, no existe normativa que regule la metodología de fabricación de este tipo de hormigón. Aun cuando, existen muchas investigaciones a nivel nacional sobre hormigones de alta resistencia superiores a los 700 kg/cm² estas han sido desarrolladas como experiencias de laboratorio y no como un producto de calidad con características constantes y entregado en forma masiva.

Todo lo referente al desarrollo de los hormigones de alta resistencia H-70 a nivel nacional, ha sido única y exclusivamente debido a la experiencia adquirida por la división El Teniente.

4.2. Carpeta de hormigón H-70.

Consiste en utilizar un hormigón de nivelación de base H-15 y un hormigón de alta resistencia H-70 (con microsilíce incorporada), en toda la zona del tránsito del vehículo LHD. La carpeta es construida con un tipo de hormigón moldeable (vibrado) de alta resistencia H-70. Las dimensiones de las carpetas tienen un espesor de 22 centímetros y un ancho de 4,5 metros en las calles (Ver figura N°4 y N°5).

Cuando se ejecuta una interrupción planificada en la pavimentación, esta debe hacerse en un lugar de coincidencia con una junta normal de construcción. En un pavimento de carretera deben colocarse barras de traspaso de carga, sin embargo, en atención a la excelente capacidad de soporte presente en la mina y a la experiencia que se ha logrado durante muchos años, estas barras pueden ser eliminadas dejando por precaución una unión endentada, la cual sería suficiente para absorber pequeñas contracciones de los paños de hormigón.

Por otro lado, dado el alto número de juntas transversales de construcción que se requieren, ya que las faenas de hormigonado en el interior de la mina son bastante lentas, se eliminan las juntas de contracción, haciendo que las primeras jueguen un doble papel, las juntas de construcción se ubican cada tres metros.

Las juntas longitudinales no se consideran puesto que las carpetas de rodado están constituidas por una sola calzada del ancho de la galería (para mayor información Ver Anexo “Posturas de Hormigones H-70”)

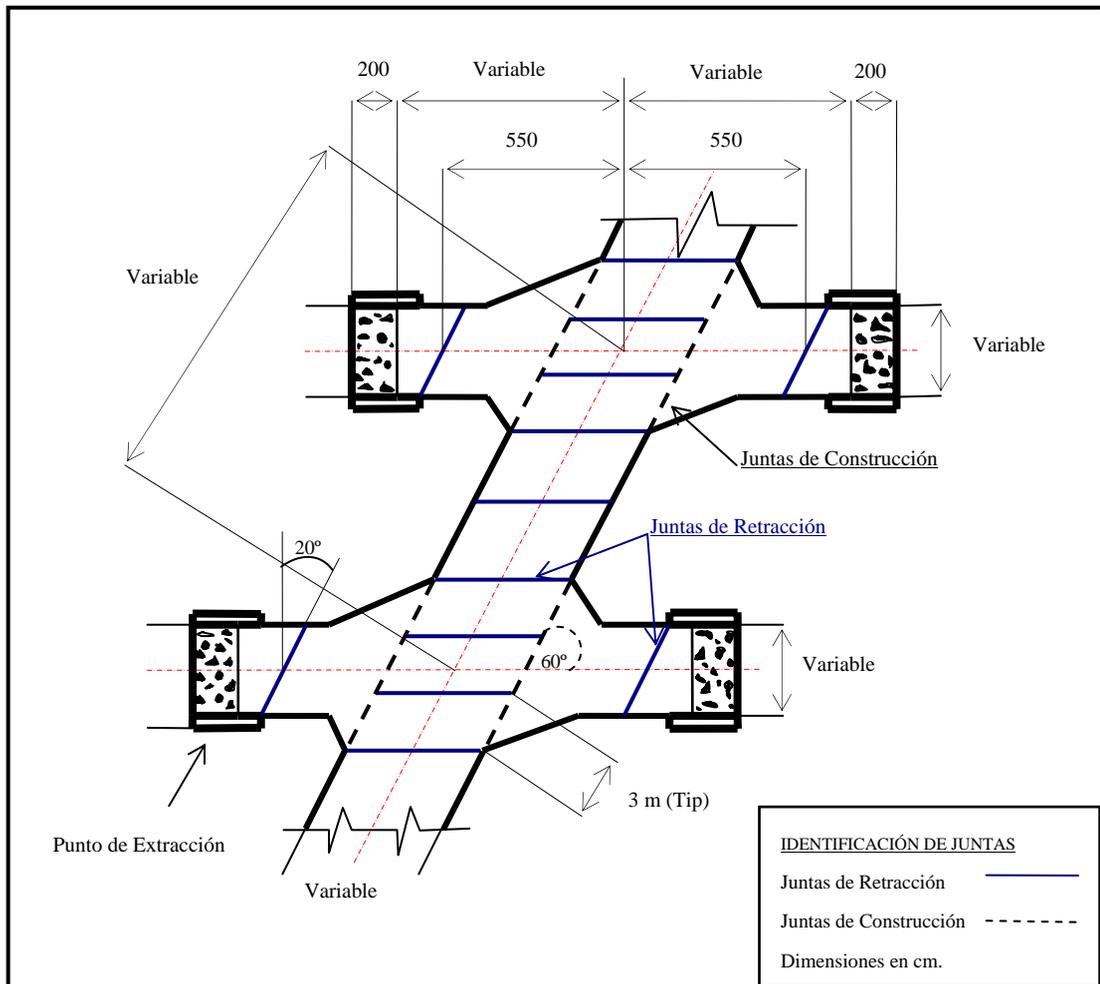


Figura 4. Planta e intersección Calle- Punto de Extracción.

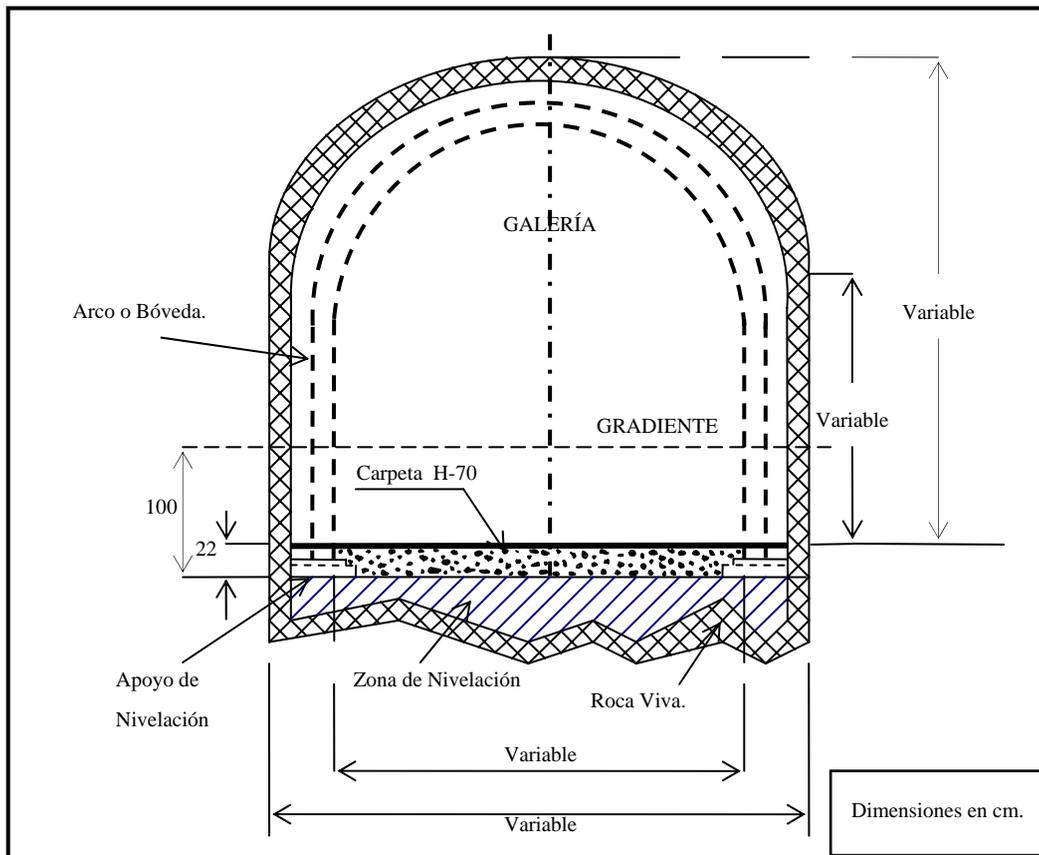


Figura 5. Corte transversal de Galería.

4.3. Microsílice (sílice en polvo).

El humo de sílice, sílica fume, o microsíllice, es un material puzolánico que agregado al cemento puede producir hormigones de alta resistencia, se conoce desde hace cincuenta años por las renombradas propiedades que le ocasiona al hormigón: mayor resistencia, menor permeabilidad, mayor resistencia al ataque de ácidos y sulfatos.

Es un subproducto de la industria de fundición del silicio y el hierro-silicio, tiene su origen en la condensación de los vapores de sílice (SiO₂) producidos en un horno de arco eléctrico sumergido, durante la reducción del cuarzo a silicio, tan pronto como los vapores de (SiO₂) entran en contacto con el oxígeno presentes en el aire, en la parte fría del horno, estos se enfrían y condensan en forma de esferas microscópica, las partículas de microsíllice son aproximadamente 100

veces mas pequeñas que el cemento.

Dada su extremada finura y alto contenido de sílice (más de un 90% de dióxido de silicio, SiO_2) la microsílíce o humo de sílice, es un altamente efectivo material puzolánico. Este reacciona puzolánicamente con la cal liberada durante la hidratación del cemento, dando lugar al “silicato de calcio hidratado”, compuesto cementante estable.

Con un tamaño inferior a las partículas del humo de cigarrillo (de donde viene su nombre común: humo de sílice), una dosis de microsílíce al 10% por peso del cemento origina entre 50.000 y 100.000 microesferas por cada grano de cemento.

Esto es, una superficie mayor a los 500.000 m^2 . Sin embargo, hay que notar que no todas las microsílíces tienen la misma calidad y que sus efectos pueden variar de un tipo de sílice a otro. Las diferencias son en su mayor parte debidas a las impurezas, composición química y nivel de aglomeración presente entre las micropartículas de sílice.

Esta aglomeración (uno de los factores más importantes a la hora de diferenciar los distintos tipos de microsílíce) puede cuantificarse a través de una dispersión ultrasónica en agua. Después de efectuada, queda una aglomeración remanente o residual que se traduce en una curva de dispersión de tamaños de las partículas de la sílice. Esta es una característica de cada tipo de microsílíce, puede ser tomada como la huella digital de cada una de ellas, y varía según su lugar de origen y metodología de producción.

A causa de esta amplia distribución de tamaños, la microsílíce ejerce un efecto de relleno en el concreto, aun cuando la dosis de cemento sea alta. Sin embargo, este efecto es significativo sólo cuando este producto se usa en conjunto con una gran cantidad de superplastificante.

Además, la magnitud de este efecto depende del estado de defloculación que tenga la microsílíce en el concreto fresco. Esto es parcialmente controlado por la forma física del producto: partículas sólidas, microsílíce densificada, aglomerada con cemento, etc.

El incremento en la resistencia, depende del diseño de la mezcla, el control de calidad, y el curado del hormigón. Un descuido en cualquiera de esos puntos, puede resultar en un hormigón menos durable y más frágil que uno normal.

Lamentablemente entre las desventajas de la microsílíce, está la segregación que presenta en el hormigón, y el peligro de aglomeración de las microesferas de sílice.

También aumenta notablemente la retracción, lo que requiere el uso de aditivos especiales, y requiere también altas cantidades de superplastificantes para dispersar bien a sus partículas y minimizar la aglomeración.

Otra desventaja es que al ser un sólido de finas proporciones, puede provocar, si bien es cierto que en condiciones drásticas de exposición, problemas a sus operadores, contaminando sus pulmones y provocando fibrosis pulmonar en una enfermedad crónica llamada silicosis, que persiste aún años después que el operador ha cesado el contacto con este producto.

Entre los intentos por evitar estas desventajas han estado, el hacer una suspensión de microsílíce, y usar sílice precipitada, lamentablemente, las soluciones con estos dos tipos de sílice producen problemas de asentamiento que las vuelven inestables y les dan una muy corta vida útil de pocos meses en vez de los años de la microsílíce sólida.

Además ambas soluciones, aún presentan las desventajas de segregación y aglomeración de las partículas de sílice. (**FERRADA, 2003**).

4.3.1. Incorporación de microsílíce en hormigones.

Existen dos modalidades para incorporar la microsílíce a hormigones, como adición y como reemplazo parcial del cemento.

Como adición se usa manteniendo el contenido de cemento invariable, con el objeto de conseguir propiedades especiales en estas mezclas, como resistencia e impermeabilidad.

Las cantidades comúnmente usadas en los hormigones y morteros, son del orden de un 5 a un 20 % del peso del cemento.

La adición de microsilíce conlleva a un aumento en la demanda de agua en las mezclas debido a la naturaleza de las partículas extremadamente finas. Por esta razón se produce una disminución en la trabajabilidad, la que se puede reestablecer con un aumento en la cantidad de agua o mediante el uso de un aditivo reductor de agua (plastificante o superplastificante).

La microsilíce incorporada a hormigones como reemplazo parcial del cemento, puede ser en cantidades de hasta un 30% del peso del cemento. El reemplazo puede ser realizado sin pérdida de resistencia, en magnitudes hasta 3 o 4 kilos de cemento por 1 kilo de microsilíce.

Igual que en el caso, en que la microsilíce es utilizada como adición, su uso como reemplazo parcial del cemento da como resultado un aumento en la demanda de agua en las mezclas. Por esto, se recomienda el uso de un aditivo reductor de agua.

La resistencia a la compresión de los hormigones se ve incrementada en comparación a aquellos hormigones sin la incorporación de microsilíce, además, se consigue en las mezclas mejores propiedades como mayor cohesión, reducción de la exudación y disminución en la porosidad en hormigones, lográndose una menor permeabilidad. *(DUPOUY, 1991)*

4.3.1.1. Propiedades de los hormigones con microsilíce incorporada.

Para el hormigón fresco:

- ✓ El color es más oscuro que el hormigón tradicional
- ✓ Con respecto a su consistencia, es más cohesivo y menos propenso a la segregación que el convencional.
- ✓ Se reduce la exudación debido a la gran afinidad de ésta con el agua. se debe tener cuidado con las grietas superficiales producto de una temprana pérdida de humedad.

Para el hormigón endurecido:

- ✓ El efecto de la microsilíce como contribución en el desarrollo de la resistencia del hormigón, se produce entre los 3 y 28 días. La resistencia a

la flexión y a la tracción evolucionan en forma similar a la compresión.

- ✓ Permeabilidad y porosidad: los hormigones con microsilíce incorporada tienen menos porosidad y por lo tanto son menos permeables que el hormigón tradicional. Los poros existentes corresponden a los de la pasta de cemento misma (0,01 μm) y no a los formados con el agregado (huecos).
- ✓ Resistencia a los sulfatos: dado que la microsilíce reacciona eficientemente con la cal liberada en la reacción de hidratación, los hormigones con microsilíce, son más resistentes a los sulfatos que los hormigones comunes.
- ✓ Resistencia a la abrasión: como se ha mencionado, la resistencia a la abrasión esta directamente relacionada con la resistencia a la compresión de los hormigones. Por esta razón la microsilíce provee al hormigón de un mejoramiento sustancial en este aspecto.

4.3.1.2. Desventajas de hormigones con microsilíce incorporada.

- ✓ Manejo: El manejo de la microsilíce, difiere del manejo requerido para el cemento, debido a su tamaño extremadamente pequeño. La microsilíce por su extremada finura y baja densidad suelta, tiene problemas de manejo, lo cual obliga a diseñar sistemas adecuados de cargío, transporte, almacenamiento y mezclado. Hay sistemas en los cuales se utiliza la microsilíce, en forma suelta o no compactada, peletizada y en pasta o barro de sílice. Todas estas formas tienen sus ventajas y desventajas, las cuales afectan su manejo, dosis, eficiencia o reactividad puzolánica. (En la tabla adjunta se presentan las características de las diferentes formas de microsilíce).
- ✓ Salud: Investigaciones realizadas sobre este aspecto han concluido que hay riesgo de contraer silicosis, es por esto, que se recomienda a los operarios utilizar la protección adecuada y al mismo tiempo, diseñar sistemas que minimicen la generación de polvo en suspensión.
- ✓ Retracción Plástica: la experiencia indica que el hormigón, con microsilíce incorporada, aumenta la tendencia a desarrollar grietas por retracción plástica. La causa es que en estos hormigones la exudación es virtualmente eliminada y no hay un exceso de agua.

FORMAS DE LA MICROSÍLICE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
NO COMPACTADA	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta reactividad puzolánica. ✓ Buen comportamiento técnico y eficiencia. ✓ No requiere protección térmica para transporte y almacenamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Polvorienta y sensible a la humedad. ✓ Costos de transporte elevado.
PELETIZADA / COMPACTADA	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo costo de transporte. ✓ Bajos volúmenes de almacenamiento y transporte requeridos. ✓ Poco polvorienta. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baja reactividad puzolánica. ✓ Comportamiento y eficiencia no excelentes. ✓ Sensible a la humedad.
PASTA O BARRO DE AGUA.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ No produce polvo. ✓ Sistemas de transporte y almacenamiento simples. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Imprecisión en dosis de sílice debido a sedimentación. ✓ Dificultad para controlar el contenido de agua en el hormigón. ✓ Tanques de almacenamiento deben agitarse constantemente, para mantener la microsíllice en suspensión. ✓ Debe controlarse el PH para evitar la prematura formación de gel. ✓ Debe controlarse la temperatura en el transporte y almacenamiento para prevenir congelamiento.

Tabla N°4. Características de comportamiento para diferentes formas de microsíllice.

4.4. Nanosílice O Sílice En Solución.

En este punto se pretende mostrar, como llega la nanosílice, a la división El Teniente, además se muestran sus ventajas y se hace una comparación con las demás sílices que se encuentran actualmente en el mercado.

Se describen los principales motivos que hicieron tomar la decisión de cambiar la microsílice en polvo, que fue utilizada por muchos años en la división, para la fabricación de los hormigones de alta resistencia “H-70” aplicados en la mina El Teniente.

4.4.1. Llegada de la Nanosílice a la división El Teniente.

La división El Teniente, en vías de obtener certificación ISO 14.001 (gestión y protección ambiental), en la minería Chilena, le pide al proveedor de aditivos una adición que cumpliera con esta normativa, que tuviera un estricto cuidado al medio ambiente y a la salud de sus operadores. Pero además, este nuevo producto debería presentar mejores propiedades que la adición utilizada (alta resistencia y gran reducción en la permeabilidad del hormigón).

La microsílice, humo de sílice o sílica fume, se utilizó durante muchos años en la división El Teniente para obtener las altas resistencias en las carpetas de hormigón H70, pero presentaba desventajas y problemas que debían ser solucionados.

Motivados por encontrar un reemplazo a este producto, el proveedor de aditivos en la división, inició una investigación entre los distintos tipos de sílice posibles de usar en el hormigón, encontrando una variedad existente hace pocos años, y que es el resultado directo de los avances de la “Nanotecnología” en el área de las partículas.

De esta forma, desde comienzo del año 2005, se utiliza para la confección de los Hormigones de Alta Resistencia H-70 en la división El Teniente, este nuevo tipo de sílice, conocido como “Nanosílice” o “Sílice en Solución.”

4.4.2. Nanotecnología en el Hormigón.

Es sabido dentro de la física y la química que un nano-material correctamente diseñado y desarrollado produce resultados mejores y más económicos que los materiales tradicionales, gracias a la estabilización y refuerzo de propiedades de la materia a un nivel mil veces más pequeño que el antiguo nivel “micro” (0.000001 mt).

La Nanosílice tiene partículas de tamaño nanométrico entre 3nm y 150nm. (1nm= 1 nanómetro = 10^{-9} mt) que es mil veces más pequeña que microsílice. Esta selección de tamaño de partícula es lo que le confiere sus singulares propiedades: mayores resistencias, plasticidad, carencia de contaminación.

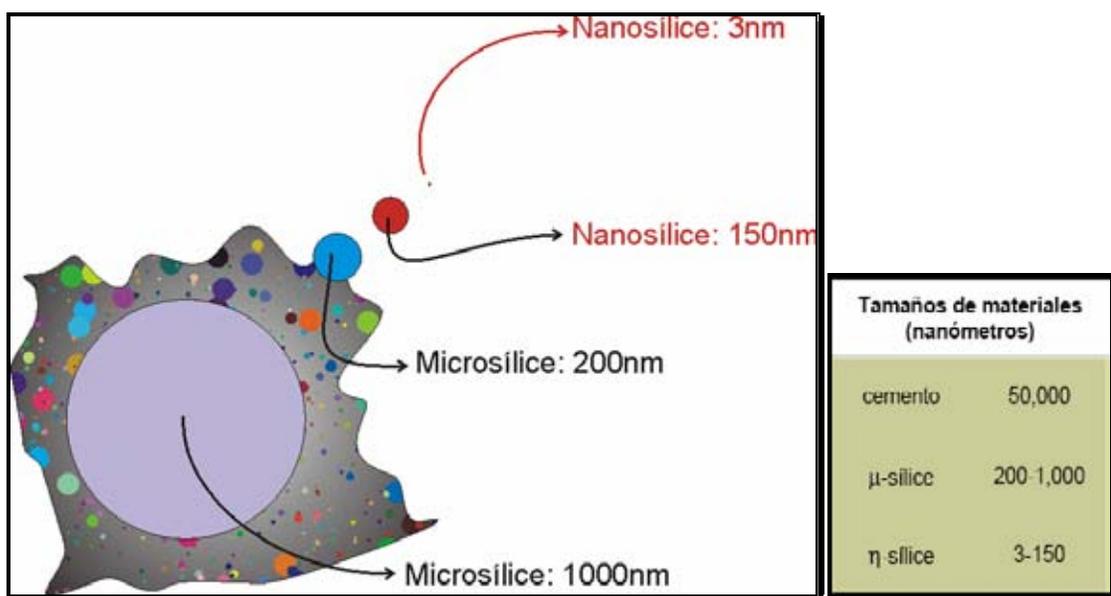
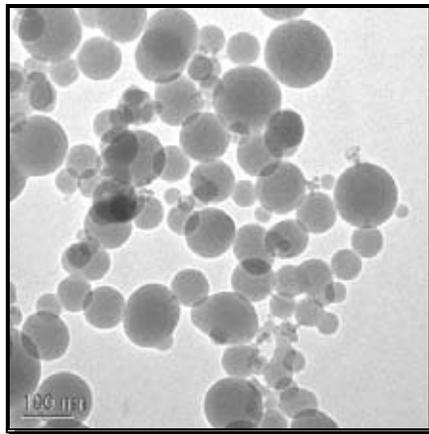


Figura 6. Comparación entre tamaños de los materiales (Nanómetros).

Creada como producto principal, directamente para ser usada en el hormigón, la nanosílice consiste en nanopartículas de sílice modificadas químicamente para permitirles estar en solución, ser estables, tener aún mejores propiedades que la microsílice, y con la clara ventaja de no contaminar; ni al medio ambiente ni a los operadores, y de carecer de sus desventajas de aglomeración y retracción.

Los avances de la Nanotecnología, han permitido que en vez de lograr los quinientos mil metros cuadrados de superficie de la microsílíce, se logren cinco millones de metros cuadrados gracias a la nanosílíce y sin los problemas de aglomeración.



Fotografía N°2 Fotografía electrónica de Nanosílíce a 100 nm.

Aparte de su alta superficie efectiva de reacción, la clave de su gran desempeño en comparación con la microsílíce, es su mayor reactividad química. La nanosílíce genera C.S.H (Silicatos de Calcio Hidratado) de tamaño nanométrico, que es el resultado final de la reacción de hidratación del cemento. Al ser de tamaño nanométrico, produce nano-partículas de C.S.H con un tamaño de entre 3 y 150 nm, lo que refuerzan la estructura del hormigón a un nivel mil veces más pequeño que la microsílíce, esto mejora sus propiedades dejando al hormigón mucho más compacto e impermeable. A medida que el cemento se hidrata, las partículas de nanosílíce se combinan con los elementos del hormigón distribuyéndose en todos los huecos que quedan entre las partículas de cemento y los agregados. (Las partículas de cemento suelen medir 50.000 nm). De esta forma, el nano-C.S.H producido, hace que el hormigón quede más compacto, con menos huecos, más resistente y con una estructura más homogénea. Hay que tener en cuenta que el C.S.H es el “pegamento” que mantiene unido al hormigón, por lo que, lo que hace en el fondo la nanosílíce, es producir nano-cemento de tamaño micrométrico.

4.4.3. Comparación entre Microsílice, Sílice Precipitada, y Nanosílice.

La microsílice, la sílice precipitada, y la nanosílice, tienen un rango que puede llamarse “similar” en cuanto a tamaño de partículas (ver tabla N°5), pero las dos primeras, al existir como una gran aglomeración de partículas y no como partículas aisladas, tienen una mucho menor área efectiva de superficie en comparación con la nanosílice.

Tipo	Densidad (g/mL)	Tamaño de partícula (nm)	Área específica de Superficie (m ² /g)	Apariencia
Nanosílice	1.15	3-150	20-1000	Líquido
Sílice precipitada	0.16	20-50	20-100	Polvo seco
Microsílice	0.3	200-1000	15-20	Polvo seco

Tabla N°5. Características generales de la nanosílice, microsílice y sílice precipitada.

De allí la alta velocidad de reacción que presenta la nanosílice y las mayores resistencias.

La nanosílice tampoco es comparable a las numerosas sílices precipitadas y coloidales de microsílice en cuanto a efectos de relleno. La nanosílice no tiene ningún efecto de relleno en sí, porque reacciona completamente con los iones calcio, es consumida totalmente, y porque el nivel de impurezas en la solución es generalmente bajo en comparación con las restantes sílices, que son obtenidas como un subproducto, con las correspondientes impurezas, en vez de ser un producto principal.

Por esta razón, la nanosílice se considera como una forma pura de sílice añadida al concreto.

4.5. Reemplazo de la Microsílice.

Por primera vez un nanoproducto (nanosílice) reemplaza a un material largamente usado en el hormigón, la microsílice es uno de los productos para el hormigón más usado en todo el mundo, esta adición lleva más de cincuenta años siendo utilizada para mejorar las propiedades del hormigón.

Sus características han permitido obtener hormigones de alta resistencia, impermeables a los ataques del agua y los agentes químicos, contribuyendo a muchas de las edificaciones de hormigón que vemos hoy en día.

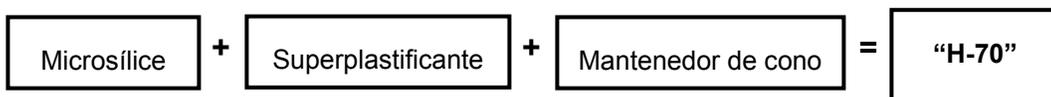
Por varios años en la división El Teniente, para alcanzar las altas resistencia (700 kg/cm²) fue necesario la utilización de la microsílice en polvo, su desventaja ha sido sin embargo, la contaminación al medio ambiente y a la salud de los operadores, es por esta razón que los operadores, deben tomar precauciones especiales, porque al ser la microsílice un material en polvo (mil veces más pequeño que el humo del cigarrillo), puede producir silicosis si las condiciones de seguridad no son las óptimas.

Diferencias entre nanosílice y microsílice.				
Tipo	Densidad (g/mL)	Tamaño de partícula (nm)	Área específica de Superficie (m ² /g)	Apariencia
Nanosílice	1.15	3-150	20-1000	Líquido
Microsílice	0.3	200-1000	15-20	Polvo seco

Tabla N°6. Diferencia entre Nanosílice y Microsílice.

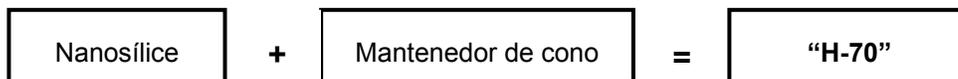
Otro factor importante a destacar, es la disminución en un producto en el diseño de los H-70, antiguamente era necesario, la utilización de microsílice en polvo más un superplastificante y un mantenedor de cono.

Diseño con Microsílice.



Hoy en día con la utilización de la nanosílice, solo es necesario un mantenedor de cono, ya que la combinación de la Nanotecnología con moléculas especialmente seleccionadas produce una plasticidad y trabajabilidad excepcional que hace innecesario el uso de superplastificantes.

Diseño con Nanosílice.



Disminuyendo el diseño en un producto (aditivo superplastificante), reduciendo los costos para la fabricación de los hormigones H-70.

Capítulo V

FORMULACIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL Y ENSAYO DE HORMIGONES.

5.1. Introducción.

Como ya se ha visto en los capítulos anteriores, la microsílíce fue utilizada por muchos años en la división El Teniente, para la confección de las carpetas de hormigón de alta resistencia H-70. Pero a principios del año 2005, esta microsílíce fue reemplazada por una nueva adición (nanosílíce), que presentaba mejoras en muchas de sus propiedades.

El objetivo experimental de este trabajo es observar la influencia de esta nueva adición Nanosílíce (sílíce en solución) en los hormigones de alta resistencia H-70, aplicados en la división El Teniente. Para determinar las modificaciones y mejoras que se producen en el hormigón.

Teniendo en cuenta que uno de los hormigones comúnmente utilizado en la división El Teniente es el H-30. Se realizan pruebas con este tipo de hormigón, para ver la influencia de la nanosílíce y los aditivos de última generación, en el desempeño de sus resistencias y poder compararlos con los resultados obtenidos con los H-70.

5.2. Planificación De La Experiencia.

5.2.1. Introducción.

La planificación de la experiencia reviste gran importancia, ya que en ella se determinan las pruebas y ensayos que se deberán realizar, para llevar a cabo un control del desarrollo de esta experiencia de acuerdo a los objetivos establecidos.

5.2.2. Esquema general.

En líneas generales, se realizarán hormigones H-70 y H-30, que incluyan el mínimo de elementos variables en su composición, de modo de observar en forma clara la influencia que genera la incorporación de aditivos y adiciones de última generación. Además, estos hormigones serán comparados con hormigones de tipo convencional (patrones). Es así, que la experiencia se planificará tratando de abordar aquellos aspectos que proporcionen y permitan obtener la mayor información posible, que ayude a comprender las modificaciones y mejoras de las propiedades del hormigón, producto de la incorporación de aditivos y adiciones.

De esta forma se realiza un “*Esquema General*” que consiste en:

✓ ***Planificación de la experiencia a realizar con los “H-30”***

- HP-1/ H-30, Patrón, Hormigón normal, (solo con agua)
- HP-2/ H-30, Teniente, Incorporación de aditivos 1 y 2.
- HP-3/ H-30, Teniente, Incorporación de aditivo 1 + Nanosílice.
- HP-4/ H-30, Potenciado, (Similar a prueba N° 3).

✓ ***Planificación de la experiencia a realizar con los “H-70”***

- HP-1/ H-70, Patrón, hormigón normal (solo con agua)
- HP-2/ H-70, Teniente; Incorporación de aditivos 1 + Nanosílice.
- HP-3/ H-70, Teniente, Incorporación de aditivos 3 + aditivo 4 + Microsílice.

Nota:

Aditivo 1 y 3: Plastificantes, mantenedor de cono.

Aditivo 2 y 4: Superplastificantes, reductores de agua.

5.2.3. Elementos constantes.

Para poder comparar los resultados obtenidos de las diferentes experiencias y visualizar en forma clara el efecto de las adiciones y aditivos, en los hormigones, se mantendrán algunos componentes y condiciones constantes.

- Dosis de cemento: Para cada tipo de experiencia H-30 y H-70, la dosis de cemento respectiva, se mantendrá constante, con el fin de tener uniformidad en la cantidad de aglomerante de las mezclas y no influir en el efecto que pudieran tener los aditivos y adiciones en los hormigones.
- Granulometría del agregado: Para todos los hormigones se usará un solo tipo de árido con el mismo origen y composición granulométrica, que corresponde a Gravilla 3/4" y Arena 3/8", provenientes del río Cachapoal y suministrado por un solo proveedor.
- Dosis de agua: Solo para la experiencia con los hormigones de prueba H-30, la dosis de agua permanece constante, hasta el hormigón de prueba N°3 (H30/HP-3), la idea es identificar las variaciones de las características del hormigón, debido a los aditivos y adiciones incorporados en las mezclas, y poder potenciar el hormigón de prueba N°4 (H30/HP-4), bajando la dosis de agua empleada.

5.2.4. Elementos variables.

- Consistencia y agua de amasado: La cantidad de agua para amasado, estará limitada por la necesidad de alcanzar la trabajabilidad adecuada, para cada tipo de hormigón.

Con respecto a este tema, se deben considerar dos puntos.

- Primero se buscará la trabajabilidad mínima para los hormigones patrones.
- Y además, se deben considerar, los requerimientos de trabajabilidad en la división. En particular, en el interior de la mina, es decir, para los H-30 se buscará una trabajabilidad mínima cono 12cm y para los H-70 un cono mínimo 16 cm.

Nota: Las condiciones para las posturas de hormigones en el interior de la mina, son completamente diferentes que en la superficie, los moldajes, la falta de personal, los espacios reducidos, hacen que el hormigón que se utiliza en la mina, deba presentar características reológicas diferentes que en el exterior.

De esta forma, es necesario un hormigón de fácil colocación (que escurra solo), sin necesidad de mucha compactación, con una alta durabilidad en medios agresivos y que además alcance altas resistencias a tempranas edades.

Es así, como los hormigones que se aplican en el interior de la mina, deben cumplir con ciertas exigencias de trabajabilidad, es decir, para los H-30, se exige una trabajabilidad mínima cono 12cm y para los H-70 un cono mínimo 16 cm.

5.2.5. Determinación de los ensayos a realizar.

A continuación se procederá a señalar las pruebas y ensayos a efectuar en las mezclas de hormigones. La elección de las pruebas y ensayos se realiza, con el criterio, de que estas revelen en forma más clara las características y efectos que produce la incorporación de los aditivos y adiciones en los hormigones.

- *Medición de la trabajabilidad y docilidad del hormigón fresco.*

La determinación de la trabajabilidad del hormigón fresco, se efectuará inmediatamente después de confeccionar las mezclas de hormigón, mediante el método del asentamiento del cono de Abrams, según la norma NCh 1019 EOf 74.

- *Ensayo de Resistencia a Compresión.*

La determinación de la resistencia a la compresión se efectuará una vez que las probetas de hormigón cumplan con la edad requerida para su ensayo. El ensayo de rotura por compresión de las probetas cúbicas, confeccionadas según la norma NCh 1017 EOf. 75, seguirá lo establecido en la norma 1037 EOf. 77 Esta prueba se realizara, como una comprobación de una de las tantas cualidades que se le atribuye a las mezclas que contienen microsilíce, como es el incremento que experimenta la resistencia mecánica.

5.3. Descripción Y Análisis De Los Materiales.

5.3.1. Introducción.

A continuación se hace una descripción y análisis de los materiales que intervendrán en la composición de dichos hormigones, ya que sus características juegan un papel muy importante en los resultados que se obtendrán en los diferentes hormigones de prueba.

5.3.2. Cemento.

Se estima realizar mezclas de hormigones, con el uso del cemento *Melón Extra*, que es un cemento Pórtland Puzolánico, clasificado como un tipo “Alta Resistencia” según la norma NCh 148 Of. 68. Este cemento se utilizará para todas las mezclas de hormigón, y será una variable constante, para identificar las variaciones y mejoras en las mezclas.

Los cementos Pórtland Puzolánicos además de los elementos necesarios para un cemento Pórtland, posee en su composición puzolanas en una proporción no mayor al 30% del peso del producto terminado. La puzolana es un material siliceo aluminoso que aunque no posee propiedades aglomerantes por si solo, las desarrolla en presencia de agua, debido a la reacción química con el hidróxido de calcio (cal hidratada) a la temperatura ambiente.

Clasificación y características del Cemento Melón Extra.

El Cemento Melón Extra es un cemento “Pórtland Puzolánico” grado Alta Resistencia que cumple con la norma Chilena NCh 148 Of. 68. Además, se clasifica Como tipo II/A -P, grado 42,5 R de la norma de la Unión Europea de cementos EN - 197; y como tipo IP de la norma ASTM C - 595.

Fraguado Inicial.....	90	(minutos)
Fraguado Final.....	150	(minutos)
Superficie Específica (Blaine).....	.5.200	(cm ² /gr)
Densidad Real.....	2,95	(gr/cm ³)

5.3.3. Áridos.

Para todos los hormigones se usará un solo tipo de árido con el mismo origen y composición granulométrica, que corresponde a Arena 3/8" y Gravilla 3/4", provenientes del río Cachapoal y suministrado por un solo proveedor (*MEGARIDOS*).

Los áridos tendrán las siguientes características.

5.3.3.1. Arena 3/8" (10 mm.)

Se trata de un agregado pétreo compuesto de partículas duras de tamaño entre 10 y 0,08 mm, originada por la fragmentación natural y artificial de la piedra en un 50% respectivamente.

- **Proceso.**

Se obtiene a partir de la selección y chancado del integral natural o materia prima, la cual pasa por un proceso de chancado básico, compuesto de un chancador primario y secundario que reduce y fragmenta la piedra. El material reducido de tamaño entre 50 y 10 mm, pasa a un tercer proceso de chancado de impacto que mejora la cubicidad y calidad de la partícula. En forma paralela, el material fino componente del integral natural, entra directamente en el proceso de tamizado, mezclándose con el aporte de partículas chancadas proveniente de los procesos anteriores. La mezcla final entra en un tornillo sin fin o lavador de arena que aparte de homogeneizar el producto reduce el exceso de finos e impurezas orgánicas.

- **Características.**

- ✓ Tamaño máximo absoluto 10 mm. (3/8")
- ✓ Porcentaje de gravilla en T4, máximo un 16%.
- ✓ Modulo de finura 3.00-3.24.
- ✓ 50% partícula rodada y 50% partícula chancada.
- ✓ Lavada, con bajo porcentaje de finos.

<i>Constantes Físicas, Arenas</i>	
Chancado	50
Finos < 0,08 mm	Máx. 4
Gravilla (T4)	Máx. 16
Absorción	Máx. 3
Humedad	Máx. 8
Equivalente de arena	Mín. 75
Desint. por sulfato	Máx. 10
Materia orgánica	Apta
Partícula desmenuzable	Máx. 3
Cloruros	Máx. 1,2
Sulfatos	Máx. 0,6
Carbón lignito	Máx. 0,5

Tabla N°7. *Parámetros máximos de la arenas*

- ***Granulometría y características físicas promedio.***

Se presenta un informe de los análisis granulométricos y propiedades físicas de la Arena 3/8", obtenidos durante el primer semestre del año 2005, de los cuales se obtendrá un promedio que será graficado en la banda granulométrica utilizada.

**ANÁLISIS DE LOS ÁRIDOS, 2005
ARENA 3/8", % EN PESO QUE PASA.**

Fecha de Ensaye:	19-01-05	23-02-05	23-03-05	20-04-05	19-05-05	16-06-05	Promedio
3/8"	100	100	100	100	100	100	100
Nº4	84	88	89	89	86	86	87
Nº 8	63	65	66	64	62	67	65
Nº 16	44	42	50	51	50	50	48
Nº 30	31	36	31	31	30	31	32
Nº 50	15	16	16	13	15	15	15
Nº 100	5	3	4	4	3	5	4
Dens. .Ap Suelta,	1,76	1,76	1,74	1,72	1,72	1,74	1,74
D .P Compactada,	1,93	1,92	1,90	1,85	1,84	1,89	1,89
Dens. Real Seca,	2,72	2,71	2,72	2,70	2,73	2,70	2,71
Absorción %	2,03	2,01	2,00	1,98	2,02	2,02	2,01
Finos < 0,08 %	1,90	2,00	1,80	1,20	1,80	1,73	1,74
Modulo de Finura	3,13	3,16	3,12	3,17	3,14	3,05	3,13

Tabla Nº8. Características físicas de la arena.

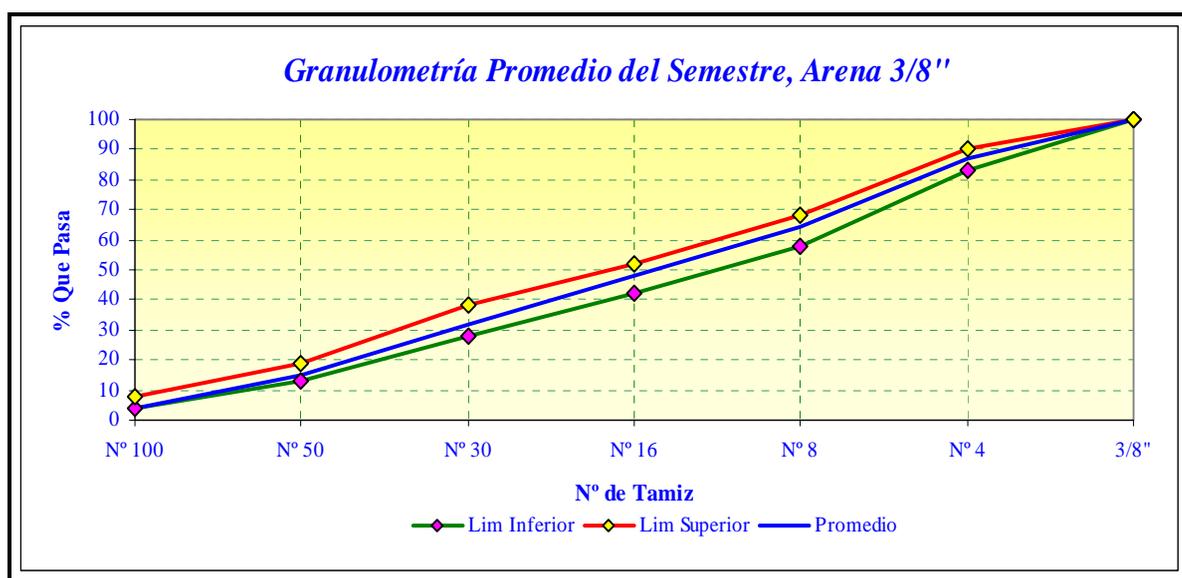


Gráfico N°1. Granulometría promedio del semestre de la arena.

Tamiz Nº	Banda Granulométrica Arenas	
	Lím. Inf.	Lím. Sup.
3/8"	100	100
Nº 4	83	90
Nº 8	58	68
Nº 16	42	52
Nº 30	28	38
Nº 50	13	19
Nº 100	4	8

Tabla N°9. Banda granulométrica de la arena.

5.3.3.2. Gravilla 3/4" (20 mm.)

Agregado pétreo compuesto de partículas duras de tamaño entre 20 y 2,5 mm, originada por la fragmentación artificial y natural de la piedra en un 80% y 20% respectivamente.

- **Proceso.**

Se obtiene a partir de la selección y chancado del material natural o materia prima, la cual pasa por un chancado básico compuesto de chancador primario y secundario que reduce y fragmenta la piedra. El material reducido de tamaño, entre 50 y 10 mm. pasa por un tercer proceso de chancado de impacto que mejora la cubicidad y calidad de la partícula, además produce un mayor volumen que aporta al producto final. En forma paralela, el material entre 20 y 10 mm. componente del integral natural, entra directamente en el proceso de tamizado, mezclándose con el aporte de partículas chancadas provenientes de los procesos anteriores. Un sistema de duchas a presión instaladas sobre las mallas, permite obtener un producto limpio y sin impurezas adheridas.

- **Características.**

- ✓ Tamaño máximo absoluto 20 mm.
- ✓ 80% Partícula chancadas cúbicas.

<i>Constantes Físicas, Gravillas</i>	
Finos < 0,08 mm	Máx. 0,8
Chancado	65-85
Laja	Máx. 3
Absorción	Máx. 1,5
Coef. Vol. Medio	Mín. 0,250
Partícula desmenuzable	Máx. 1
Desgaste de los Ángeles	Máx. 30
Cloruros	Máx. 1,2
Sulfatos	Máx. 0,6

Tabla N°10. Parámetros máximos de la gravilla.

- **Granulometría y características físicas promedio.**

Se presenta un informe de los análisis granulométricos y propiedades físicas de la Gravilla 3/4", obtenidos durante el primer semestre del 2005, de los cuales se obtendrá un promedio que será graficado en la banda granulométrica utilizada.

**ANÁLISIS DE LOS ÁRIDOS, 2005
GRAVILLA 3/4", % EN PESO QUE PASA.**

Fecha Ensaye:	19-01-05	23-02-05	23-03-05	20-04-05	19-05-05	16-06-05	Promedio
1"	100	100	100	100	100	100	100
3/4"	97	97	97	98	98	98	98
1/2"	56	56	52	52	52	50	53
3/8"	28	26	26	27	27	27	27
Nº4	2	2	3	2	3	2	2
Nº 8	1	1	1	1	1	1	1
Dens. Ap Suelta	1,57	1,57	1,53	1,54	1,55	1,56	1,55
D .Ap .Compact.	1,75	1,73	1,63	1,65	1,67	1,67	1,68
Dens. Real Seca	2,77	2,76	2,76	2,74	2,74	2,75	2,75
Absorción %	0,80	0,80	1,10	1,00	0,90	0,90	0,92
Finos < 0,08 %	0,30	0,45	0,52	0,43	0,46	0,37	0,42

Tabla Nº11. Características físicas de la gravilla.

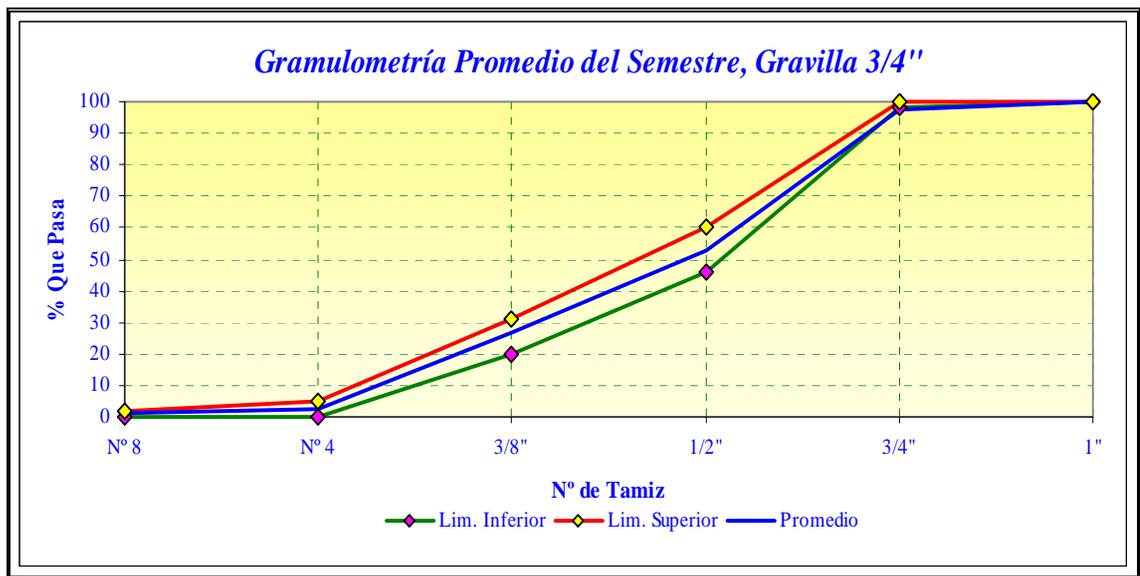


Gráfico N°2. Granulometría promedio del semestre de la gravilla.

Tamiz Nº	Banda Granulométrica de la Gravilla	
	Lím. Inf.	Lím. Sup.
1"	100	100
3/4"	98	100
1/2"	46	60
3/8"	20	31
Nº 4	0	5
Nº 8	0	2

Tabla N°12. Banda granulométrica de la gravilla.

5.3.4. Aditivos.

En general el uso de los aditivos plastificantes es de empleo universal, siendo adecuado para la mayor parte de los hormigones. En algunos países su uso es tan generalizado, que constituye un componente habitual en ellos.

Su finalidad es mejorar la docilidad de las mezclas lo que permite disminuir la razón agua/cemento, produciendo un aumento de la compacidad. La disminución de los huecos en el interior de las masas de las mezclas, beneficiará la impermeabilidad y la resistencia de los hormigones.

En las dos experiencias a realizar, tanto para los H-30 como los H-70 se utilizarán los siguientes aditivos.

Aditivo 1: RDA-32, Plastificante, Mantenedor de cono (ULMEN)

Dosis Recomendada: 0,3 a 0,7% del Peso del Cemento.

Densidad: 1,19 +/- 0,02 (Kg. / Lts)

Aditivo 2: SPER-2300, Superplastificante, Reductor de agua. (ULMEN)

Dosis Recomendada: 0,3 a 0,7 % del Peso del Cemento.

Densidad: 1,14 +/- 0,02 (Kg. /Lts)

Aditivo 3: POZZOLITH-121, Plastificante, Retardador de fraguado (MBT)

Dosis Recomendada: 0,45 a 0,8 % del Peso del Cemento

Densidad: 1,14 +/- 0,01 (Kg. /Lts).

Aditivo 4: RHEOBUILD-1000, Reductor de agua de alto rango (MBT)

Dosis Recomendada: 0,8 a 1,8 % del Peso del Cemento

Densidad: 1,19 +/- 0,01 (Kg. /Lts).

5.3.5. Adiciones.

El uso de los Plastificantes en mezclas de hormigón con incorporación de adiciones (Microsílice) se realiza con la finalidad de regular la demanda de agua, incrementada por la presencia de microsílice en ella y conseguir una trabajabilidad o resistencia adecuada.

Se hace una descripción de las características más importantes de las adiciones que se utilizaran en los hormigones de prueba.

Adición 1: GAIA, Microsílice en solución, Nanosílice (ULMEN)

Dosis Recomendada: 0,2 a 2,1% del Peso del Cemento

Densidad: 1,03 +/- 0,02 (Kg. / lts)

Adición 2: RHEOMAC, Microsílice en Polvo, Compactada y Seca (MBT)

Dosis Recomendada: 5 a 15 % del Peso del Cemento

Densidad: 1.2 +/- 0,01 (Kg. / lts)

5.3.6. Agua.

El agua no encierra mayor *problemática* en su utilización, la condición mínima que se debe cumplir en la confección de hormigones de alta resistencia, es utilizar agua que sea potable, condición que se adopto en la realización de estas pruebas.

5.4. Procedimientos para el Desarrollo de la Experiencia.

5.4.1. Introducción

Este ítem está abocado a tratar materias enfocadas a la descripción de los procedimientos (según normativa), que se utilizarán en la fabricación de las mezclas de hormigón, confección de probetas, almacenamiento de ellas y ensayos de resistencia a la compresión, ya que esto será de gran importancia para el estudio de la influencia que podría tener la incorporación de las adiciones y aditivos.

En general toda la operatoria utilizada en los ensayos de las mezclas de hormigón, se basarán en los procedimientos y metodologías previamente establecidas en las normas respectivas, estas serán identificadas en cada experiencia.

5.4.2. Preparación de las mezclas de hormigones de prueba

En el caso en que se usen aditivos líquidos, estos serán considerados dentro del agua para el amasado de los hormigones.

En el caso en que se usen aditivos insolubles, estos se mezclarán con una parte o con la totalidad del cemento o del árido fino.

Las adiciones que se empleen en cantidades superiores al 10% de la masa del cemento se incorporarán a la amasada en la misma forma que este aglomerante. En dosis menores al 10% se incorporan como los aditivos mencionados anteriormente.

El mezclado del hormigón se realizará preferentemente por mezclado mecánico. (NCh 1018 Eof 77)

5.4.3. Determinación de la trabajabilidad y docilidad del hormigón.

La determinación de la trabajabilidad del hormigón se lleva a cabo mediante el método de asentamiento de cono de Abrams, cuyos procedimientos se encuentran en la norma NCh 1019 EOf.74.

El método de asentamiento de cono de Abrams, determina la docilidad del hormigón fresco por la disminución de altura que experimenta el tronco de cono moldeado de hormigón fresco.

5.4.4. Confección y curado de las probetas de hormigón

Cuando se requieran probetas para ensayos de compresión se confeccionarán y curarán de acuerdo con los procedimientos establecidos en la NCh 1017 EOf.75.

Cuando se requiera refrentar estas probetas, se aplicarán los procedimientos establecidos en la NCh 1172.

La compactación de las probetas, se basará en el asentamiento del cono de Abrams, de acuerdo con la tabla 3, de la norma NCh 1017 EOf.75

A continuación se presenta el método de compactación según normativa.

5.4.4.1. Apisonamiento:

- ✓ Colocar el hormigón en dos capas de similar espesor.
- ✓ Apisonar con la varilla distribuyendo los golpes en toda la sección, a razón de 8 golpes por cada 100 cm² de superficie.
- ✓ Apisonar toda la capa inferior en toda su altura sin golpear el fondo del molde.
- ✓ Apisonar la capa superior de modo que el pisón penetre en la capa subyacente en aproximadamente 2 cm.

Después de apisonar cada capa, se recomienda pasar una plana entre el hormigón y los costados interiores de los moldes, y golpear suavemente los costados en todos los tipos de moldes, para cerrar los vacíos de la varilla.

5.4.4.2. Vibrado:

- Vibrado interno:
 - ✓ Se coloca el hormigón en una capa de espesor.
 - ✓ Se vibra la capa con una inserción en la zona central, para esto se introduce el vibrador verticalmente hasta aproximadamente 2 centímetros del fondo. Se realiza la operación sin tocar las caras ni el fondo del molde.
 - ✓ Se retira el vibrador tan lentamente como sea posible, rellenando con hormigón fresco la parte superior, de modo de mantener el molde, constantemente lleno.
 - ✓ Se vibra solamente hasta que una pequeña capa de lechada cubra la superficie del hormigón.

- Vibrado externo:
 - ✓ Fijar firmemente el molde al vibrador, de modo que ambos vibren solidarios.
 - ✓ Colocar todo el hormigón en una sola capa, manteniendo en todo momento un exceso de hormigón por sobre el borde del molde.
 - ✓ Vibrar el tiempo necesario para asegurar la compactación, hasta que una delgada capa de hormigón cubra dicha superficie.
 - ✓ Una vez que se ha compactado el hormigón se enrasa superficialmente con el pisón, con un movimiento de aserrado iniciado desde el centro de la sección de la probeta, y evitando separar del grueso, finalmente alisar la superficie.
 - ✓ Luego se marca la probeta (sin alterar la probeta), de tal modo que pueda ser identificada en cualquier momento.

- Cámara de Curado: Colocar las probetas a temperatura entre 290 K y 296 K (17°C a 23°C) en alguna de estas condiciones de humedad: Sumergida en agua tranquila y saturada de cal, enterradas en arena húmeda o colocada en una cámara con una humedad relativa igual o superior al 90%.

- Desmolde de las probetas: Desmoldar las probetas cúbicas después de 20 horas, siempre que las condiciones de endurecimiento permitan un desmolde sin causar daños a la probetas.
- Refrendado de probetas: Refrentar las superficies que entrarán en contacto con las piezas de aplicación de carga de la máquina de ensayo, según la norma NCh 1172, cuando no cumpla con las tolerancias de planeidad y ángulos, especificadas en la norma NCh 1017 EOf.75.

5.4.5. Ensayo de resistencia a compresión de las probetas.

El ensayo de rotura por compresión de las probetas cúbicas, confeccionadas según la norma NCh 1017 EOf. 75, seguirá lo establecido en la norma 1037 EOf. 77 según esta norma, se menciona el método para realizar este ensayo.

Se calcula la resistencia a la compresión en los hormigones como la tensión de rotura según la formula siguiente.

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

En que:

R_c= Tensión de rotura, N/mm² (kgf/cm²)

P= Carga máxima aplicada por la máquina de ensayo, N (kgf); y

S= Sección de ensayo. mm² (cm²)

Para probeta cúbica.

S= a x b

Donde:

a = Ancho promedio, mm (cm²)

b = Fondo promedio, mm (cm²)

5.5. Desarrollo De La Experiencia.

5.5.1. Introducción.

En este ítem se describe, la forma en que se realizaron los hormigones de prueba, además se señalan las características más importantes que presentaron las mezclas de hormigón.

En general toda la operatoria utilizada en este capítulo, se basará en los procedimientos y metodologías previamente señalados en el capítulo anterior “Procedimientos para el Desarrollo de la Experiencia”.

5.5.2. Preparación De Las Mezclas De Hormigón.

El mezclado del hormigón se efectuó en forma mecánica, en una mezcladora normalizada (Betонера) de eje inclinado, con capacidad de 50 litros de rendimiento efectivo.

Se realizaron 7 amasadas de 35 litros cada una, para cada una de las diferentes mezclas de hormigón se confeccionaron 8 probetas cúbicas de 15 centímetros de arista, que se ensayaron de a dos, a las edades de 3, 7, 28 y 56 días, esto arroja un total de 56 ensayos.

El agua de amasado fue corregida según la humedad determinada en los áridos, descontada la absorción de estos, hasta la condición de saturado superficialmente seco.

El orden de incorporación de los materiales se realizó de la siguiente manera.

✓ Para Hormigones Patrones.

Se mezclan toda la arena, el cemento y la gravilla, se revuelve lentamente de tal forma que el cemento quede completamente distribuido en los áridos, finalmente se agrega el agua de amasado, y se procede a la “revoltura final”, hasta notar una mezcla homogénea.

✓ **Para Hormigones con Microsílice en Polvo.**

Se mezclan la arena, el cemento la gravilla y la microsílíce en polvo, se revuelve lentamente de tal forma que la microsílíce quede completamente distribuida en los demás componentes, luego se agrega el agua de amasado, y finalmente los aditivos en solución, procediendo a la “revoltura final”, hasta notar una mezcla homogénea.



Fotografía N°3 Mezclado de hormigón con microsílíce, H70/ HP-3.

✓ **Para hormigones con Microsílice líquida (Nanosílíce).**

Se mezclan el cemento con los áridos y se revuelve lentamente de tal forma que el cemento quede completamente distribuido, luego se agrega el agua de amasado y finalmente los aditivos y microsílíce en solución, de esta forma se procede entonces a la “revoltura final”, hasta notar una mezcla homogénea.

❖ **Revoltura final**

Una vez incorporados todos los materiales para la confección de los hormigones, se procede a la revoltura final de estos, durante tres minutos, luego se deja reposar por otros tres minutos para finalmente, revolver por dos minutos más.

5.5.3. Determinación De La Trabajabilidad De Los Hormigones.

En la determinación de la docilidad de los hormigones se distinguen dos experiencias, primero para los H-30 y luego los H-70.

5.5.3.1. Realización de la experiencia para los H-30.

En los hormigones H-30 se buscó la trabajabilidad mínima para el hormigón patrón, (cono 3 cm.), esta dosis de agua se mantuvo constante para los dos siguientes ensayos (HP-2 y HP-3).

❖ Hormigón Patrón, (sin aditivo, solo con agua)

H30/ HP-1	
Características	
Hora:	15:45 p.m.
Dosis de agua:	4,25 Litros
Cono:	3 cm.
T° Hormigón	11,5 °C
T° Ambiente	9,6 °C

Tabla N°13. Características del hormigón de prueba N°1, H-30.

Se busca la trabajabilidad mínima para esta mezcla, es decir, un cono 3 cm. El hormigón presenta un aspecto grueso, rígido, áspero, con muy mala trabajabilidad. De acuerdo a la trabajabilidad del hormigón (Tabla 3, de la NCh 1017), la compactación del hormigón se realizó mediante el método de vibrado (vibrador de inmersión).

A las 12 horas después de haber confeccionado esta mezcla, este hormigón se presenta sin problemas con término de fragüe normal.

❖ **Hormigón con incorporación de aditivos 1 y 2.**

H30/ HP-2	
Características	
Hora:	16:45
Dosis de agua:	4,25 Litros
Cono:	6 cm.
T° Hormigón	16,2 °C
T° Ambiente	14,5 °C

Tabla N°14. Características del hormigón de prueba N°2, H-30.

La razón agua/cemento permanece constante, (igual al primer hormigón de prueba). El hormigón presenta un aspecto plástico y brillante, con mejor trabajabilidad, notándose un incremento en la docilidad en comparación con el hormigón anterior, es un hormigón relativamente homogéneo.

De acuerdo a la trabajabilidad del hormigón (Tabla 3, de la NCh 1017), la compactación del hormigón se realizó mediante el método de vibrado (vibrador de inmersión).



Fotografía N°4 Vibrado de probetas de hormigón.

A las 12 horas, después de haber confeccionado esta mezcla, este hormigón se presenta fresco con indicio de término de fragüe.

❖ **Hormigón con incorporación de aditivo 1 + Nanosíllice.**

H30/ HP-3	
Características	
Hora:	17:35
Dosis de agua:	4,25 Litros.
Cono:	18 cm.
T° Hormigón	15,1 °C
T° Ambiente	14,2 °C

Tabla N°15. Características del hormigón de prueba N°3, H-30.

La razón agua/cemento permanece constante, (igual al hormigón de prueba patrón). El hormigón presenta muy mala trabajabilidad, segregación y exudación, no hay cohesión en el hormigón como consecuencia se desarma el cono, muchas burbujas (las que producen poros internos en la masa de hormigón), no se nota la presencia de finos, el hormigón no es homogéneo.

De acuerdo a la trabajabilidad del hormigón (Tabla 3, de la NCh 1017), la compactación del hormigón se realizó mediante el método de apisonamiento (varilla o pisón).

A las 12 horas, después de haber confeccionado esta mezcla, este hormigón se presenta fresco, sin indicios de término de fragüe y con lechada superficial.

❖ **Hormigón Potenciado.**

H30/ HP-4	
Características	
Hora:	18:05
Dosis de agua:	3,5 Litros
Cono:	13 cm.
T° Hormigón	14,9 °C
T° Ambiente	13,8, °C

Tabla N°16. Características del hormigón de prueba N°4, H-30.

Al observar las propiedades negativas en el hormigón de prueba anterior, (con mucha segregación y exudación.) Se determina realizar una nueva prueba,

similar a la mezcla anterior, pero bajando la relación agua/cemento, con el objetivo de obtener un cono 12, que es la trabajabilidad recomendada por la división para los hormigones H-30.

Al reducir la dosis de agua en un 18% (de 4,25 a 3,5 litros), el hormigón de prueba N°4 (hormigón potenciado) experimenta una disminución en la trabajabilidad pasando de un cono 18 a un cono 13.

El hormigón presenta un aspecto homogéneo, dócil, trabajable, más plástico y brillante. De acuerdo a la trabajabilidad del hormigón (Tabla 3, de la NCh 1017), la compactación del hormigón se realizó mediante el método de apisonamiento (varilla o pisón).

A las 12 horas después de haber confeccionado esta mezcla, este hormigón se presenta sin problemas con término de fragüe normal.

5.5.3.2. Realización de la experiencia para los H-70.

Para H-70 se buscó la trabajabilidad adecuada para cada mezcla de hormigón.

❖ **Hormigón patrón, (sin aditivo, solo con agua).**

H70/ HP-1	
Características	
Hora:	14:30
Dosis de agua:	5,6 Litros
Cono:	5 cm.
T° Hormigón	22 °C
T° Ambiente	19,2 °C

Tabla N°17. Características del hormigón de prueba N°1, H-70.



Fotografía N°5 Ensayo del cono de Abrams, H70/ HP-1.

Para este hormigón de prueba patrón, se busco una trabajabilidad que fuera comúnmente utilizada en cualquier obra, (cono 5 cm.). El hormigón presenta un aspecto grueso, rígido, áspero, con mala trabajabilidad.

De acuerdo a la trabajabilidad del hormigón (Tabla 3, de la NCh 1017), la compactación del hormigón se realizó mediante el método de vibrado (vibrador de inmersión). A las 12 horas después de haber confeccionado esta mezcla,

este hormigón se presenta sin problemas con término de fragüe normal.

❖ **Hormigón con incorporación de aditivos 1 + Nanosílice.**

H70/ HP-2	
Características	
Hora:	15:40
Dosis de agua:	4,6 Litros
Cono:	16 cm.
T° Hormigón	17,5 °C
T° Ambiente	15 °C

Tabla N°18. Características del hormigón de prueba N°2, H-70.



Fotografía N°6 Ensayo del cono de Abrams, H70/ HP-2.

Para este hormigón de prueba, se busco la trabajabilidad recomendada en interior mina, para los H-70. (Cono 16).

El hormigón presenta un aspecto plástico, brillante, homogéneo, notándose un incremento notable en la docilidad en comparación con el hormigón anterior.

De acuerdo a la trabajabilidad del hormigón (Tabla 3, de la NCh 1017), la compactación del hormigón se realizó mediante el método de apisonamiento.

A las 12 horas después de haber confeccionado esta mezcla, este hormigón se presenta sin problemas con término de fragüe normal.

❖ **Hormigón con incorporación de aditivos 3+ aditivo 4 + Microsílice.**

Para este hormigón de prueba, se busco al igual que en la prueba anterior la trabajabilidad recomendada en interior mina, para los H-70. (Cono 16),

Aun cuando, se ingresaron los aditivos 3 y 4, junto con la dosis de agua del hormigón de prueba anterior, se aprecio que la trabajabilidad no era la adecuada, por tanto se continuó con la incorporación de agua a fin de lograr cono 16, pero al observar que la dosis de agua se acercaba a la empleada en el hormigón patrón y solo lográbamos aproximarnos a cono 12 en la betonera, se determina no incorporar más agua, puesto que nos afectaría directamente en la resistencia mecánica del hormigón.

H70/ HP-3	
Características	
Hora:	16:35
Dosis de agua:	5,40
Cono:	12 cm.
T° Hormigón	18,2 °C
T° Ambiente	15,9 °C

Tabla N°19. Características del hormigón de prueba N°3, H-70.



Fotografía N°7 Hormigón de prueba N°3, H70/ HP-3.

El hormigón se presenta más pesado (denso), homogéneo, pero menos trabajable en comparación con el hormigón anterior, opaco, y con muchas burbujas.

De acuerdo a la trabajabilidad del hormigón (Tabla 3, de la NCh 1017), la compactación del hormigón se realizó mediante el método de apisonamiento (varilla o pisón).



Fotografía N°8 Ensayo del cono de Abrams, H70/ HP-3.

A las 12 horas después de haber confeccionado esta mezcla, este hormigón se presenta sin problemas con término de fragüe normal.

5.6. Confección Y Curado De Probetas De Hormigón.

Las probetas de hormigón se aceitaron interiormente por una delgada película de aceite mineral, para prevenir la adherencia de los componentes del hormigón con el molde (plástico). Se utilizaron moldes cúbicos de 15 centímetros, colocando el hormigón cuidadosamente dentro de los moldes para evitar segregación.

Terminada la confección de las probetas se ingresan a cámara de curado, con lo cual se evita la pérdida de humedad por evaporación, después de 24 horas las probetas fueron desmoldadas e ingresadas nuevamente a la cámara, hasta el día que cumplieron la edad para ser ensayadas. (Ver capítulo 5.4 “Procedimiento para el desarrollo de la experiencia”).

Las condiciones de la cámara de curado fueron: temperatura 19°C y humedad 97% cumpliendo con lo recomendado por la norma NCh 1017 EOf.75.



Fotografía N°9 Probetas de hormigón terminadas.



Fotografía N°10 Cámara de curado.

Las probetas cumplen con las condiciones de planeidad y ángulos especificadas en la norma 1017 EOf.75, por lo tanto no será necesario refrentarlas.

5.7. Ensayo De Resistencia A La Compresión De Los Hormigones De Prueba.

De cada amasada se obtuvieron 8 probetas, las cuales fueron ensayadas de a dos y a edades de 3, 7, 28 y 56 días, totalizando 56 ensayos.

Para la ejecución del ensayo de compresión, se puso especial cuidado en alinear y centrar la probeta en el plato de la prensa, se procede a cargar la probeta a velocidad uniforme de 3,5 Kg./cm²/seg., hasta el primer punto de quiebre (término del rango elástico del hormigón), se continua con la aplicación de carga prestando especial atención a detectar el segundo punto de quiebre, logrado este punto, se detiene el proceso de carga y se registra esta lectura como carga máxima de resistencia a la compresión de la probeta.



Fotografía N°11 Ensayo de resistencia a la compresión.

En la realización de la experiencia se puso especial cuidado en la forma de rotura del hormigón y su aspecto visual interno.



Fotografía N°12 Probetas de hormigón ensayadas.

5.8. Resultado De Los Hormigones De Prueba.

Una vez que las probetas alcanzaron la edad correspondiente, estas fueron ensayadas, lográndose los siguientes resultados de resistencia media a la compresión a los 3, 7, 28, 56 días.

Resistencias alcanzadas por los hormigones de prueba H-30. (Kg/cm²)

Características, de los Hormigones de Prueba H-30		Razón A/C	Razón A/C+Ms	Cono (cm.)	Resist. 3 días	Resist. 7 días	Resist. 28 días	Resist 56 días
HP-1	Agua	0,40	-	3	236	309	376	426
HP-2	A1+ A2	0,40	-	6	239	354	435	482
HP-3	A1+ Nanosílice	-	0,393	20	202	303	369	400
HP-4	A1+ Nanosílice	-	0,323	13	285	398	484	512

Tabla N°20. Resistencias alcanzadas por los hormigones de prueba H-30.

Resistencias alcanzadas por los hormigones de prueba H-70. (Kg/cm²)

Características, de los Hormigones de Prueba H-70		Razón A/C	Razón A/C+Ms	Cono (cm.)	Resist. 3 días	Resist. 7 días	Resist. 28 días	Resist 56 días
HP-1	Agua	0,340	-	5	393	448	522	581
HP-2	A1+Nanosílice	-	0,273	16	645	749	840	879
HP-3	A3+A4+ Microsílice.	-	0,310	12	542	628	710	713

Tabla N°21. Resistencias alcanzadas por los hormigones de prueba H-70.

Capítulo VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

6.1. Influencia De La Edad En La Resistencia De Los Hormigones.

Como la resistencia del hormigón aumenta con la edad, es importante poder determinar si este cumple con su resistencia especificada, para esto se someten las probetas al ensayo de ruptura por compresión a los 28 días de edad.

Además de observar el comportamiento de las probetas a los 28 días se investigo también la resistencias alcanzadas a los 3 y 7 días de edad, de esta forma, se puede cuantificar el grado de cumplimiento con su resistencia especificada.

A fin de corroborar la continua ganancia de resistencia a través del tiempo, más allá de los 28 días, se analizan también las resistencias alcanzadas a los 56 días.

6.1.1. Hormigones de prueba H-30.

A continuación se presentan los gráficos, con las curvas de evolución de resistencias a la compresión para los hormigones H-30. Para esto se ensayaron probetas a los 3, 7, 28 y 56 días de edad. Estos gráficos muestran la influencia de la edad en la resistencia para estos hormigones.

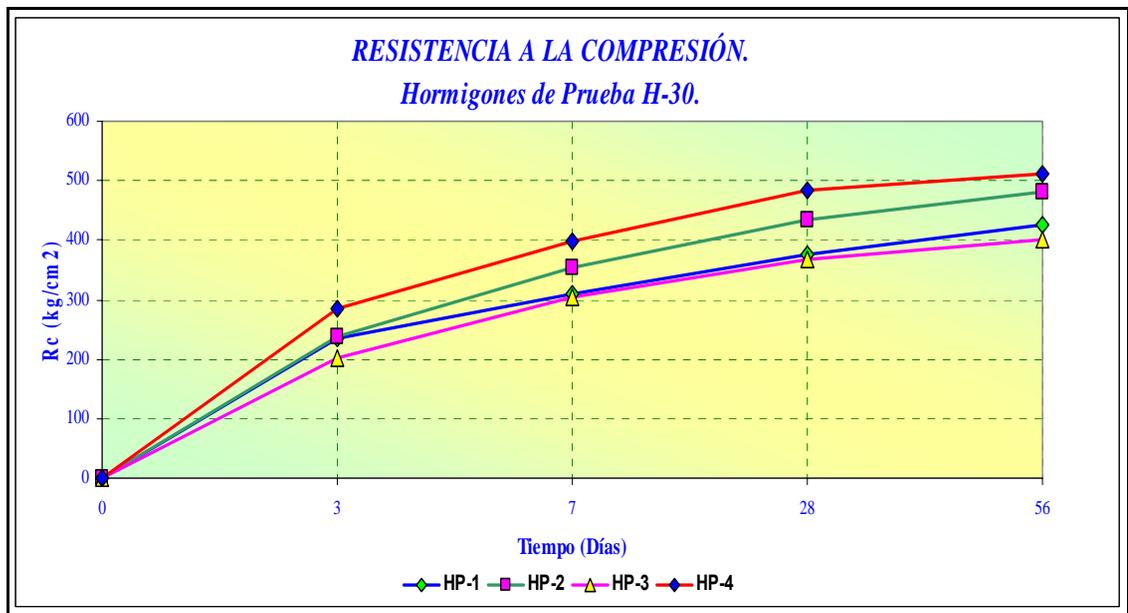


Gráfico N°3. Resistencia a la compresión, Hormigones de Prueba H-30.

Al hacer una observación general del gráfico, se aprecia que todos los hormigones de prueba superan la resistencia especificada a los 28 días (300 kg/cm²), sin embargo, el hormigón de prueba N°3, tiene un comportamiento bastante deficiente, encontrándose siempre por debajo las resistencias del hormigón patrón, influenciado principalmente por la dosis de agua empleada en su confección y la adición de Nanosílice.

La combinación de dos aditivos de última generación que se incorporaron al hormigón de prueba N°2, resultó adecuado para la obtención de docilidad y desarrollo de su resistencia mecánica.

Sin duda, el hormigón que presenta mejor comportamiento durante todas las edades, es el hormigón de prueba N°4 (potenciado), esto se debe a que se

trabajo en base a la dosificación del hormigón de prueba N°3, en lo referente a la razón agua/cemento para un descenso de cono 12, obteniendo como resultado un incremento de la resistencia. Esta colada fue la que alcanzo la mayor resistencia a la compresión llegando a 512 kg/cm² a los 56 días de edad.

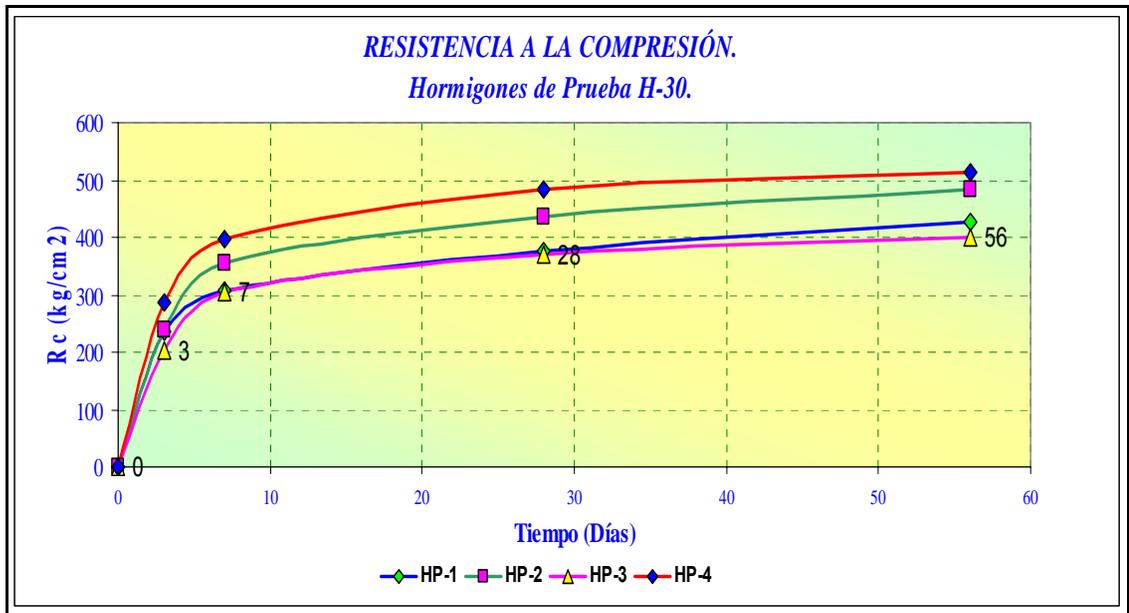


Gráfico N°4. Ganancia de resistencias a tempranas edades para Hormigones de Prueba H-30.

En este gráfico se puede apreciar de mejor forma la ganancia de resistencia a tempranas edades. Se observa claramente que el hormigón potenciado (HP-4), es el que alcanza las mejores resistencias, llegando a 285 kg/cm² a los 3 días, que corresponde a un 95% de su resistencia especificada.

6.1.2. Hormigones de prueba H-70.

A continuación se presentan los gráficos, con las curvas de evolución de resistencias a la compresión para los hormigones H-70. Para esto se ensayaron probetas a los 3, 7, 28 y 56 días de edad.

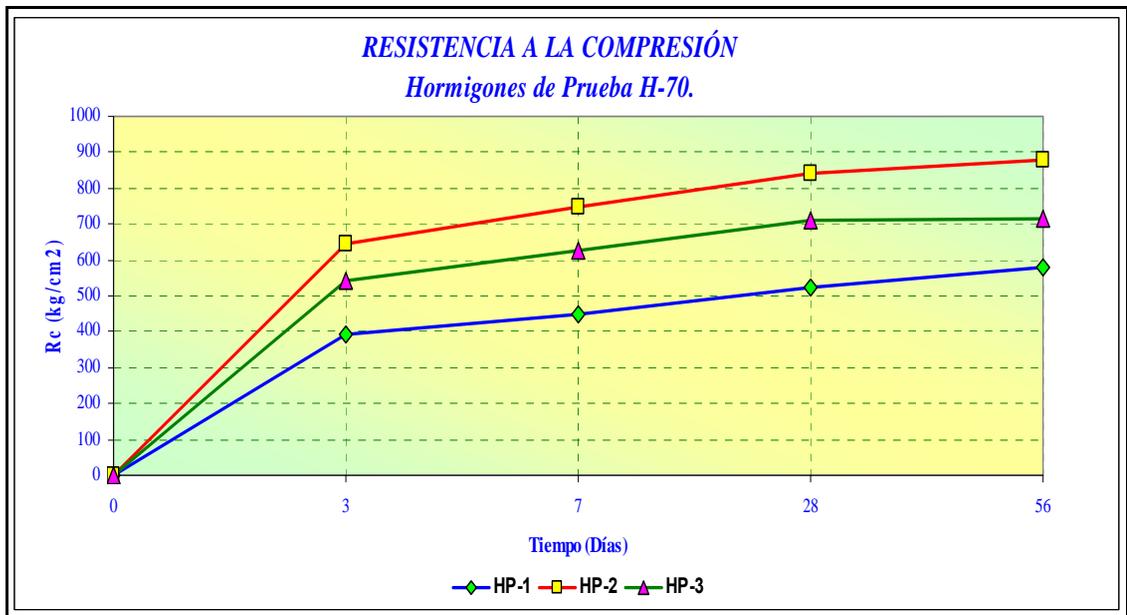


Gráfico N°5. Resistencia a la compresión, Hormigones de Prueba H-70.

Como se puede apreciar en el gráfico, el hormigón patrón (HP-1) solo alcanza 522 kg/cm² lo que corresponde al 75% de la resistencia especificada. Si bien es cierto, ambos hormigones con incorporación de adiciones (HP-2 y HP-3) superan la resistencia especificada (700 kg/cm²), el que presenta un mejor comportamiento es el hormigón de prueba N°2 (con nanosílice incorporada), siendo la colada con mejor evolución de resistencias, alcanzando como máximo 879 kg/cm² a los 56 días de edad.

Al hacer una comparación entre los dos hormigones con adiciones incorporadas, se observa, que el hormigón con nanosílice (HP-2) presenta una ganancia en la resistencia de un 18%, con respecto al hormigón de prueba N°3 (microsílice incorporada) a los 28 días de edad.

Otro punto que vale la pena destacar, es que el hormigón patrón alcanza 522

kg/cm² a los 28 días de edad, lo que significa que se pueden obtener hormigones de alta resistencia sin la incorporación de aditivos y adiciones. Teniendo en cuenta el concepto de alta resistencia en Chile, como aquellos hormigones que superan los 50 Mpa. (Ver capítulo II, “Definición de Alta Resistencia”).

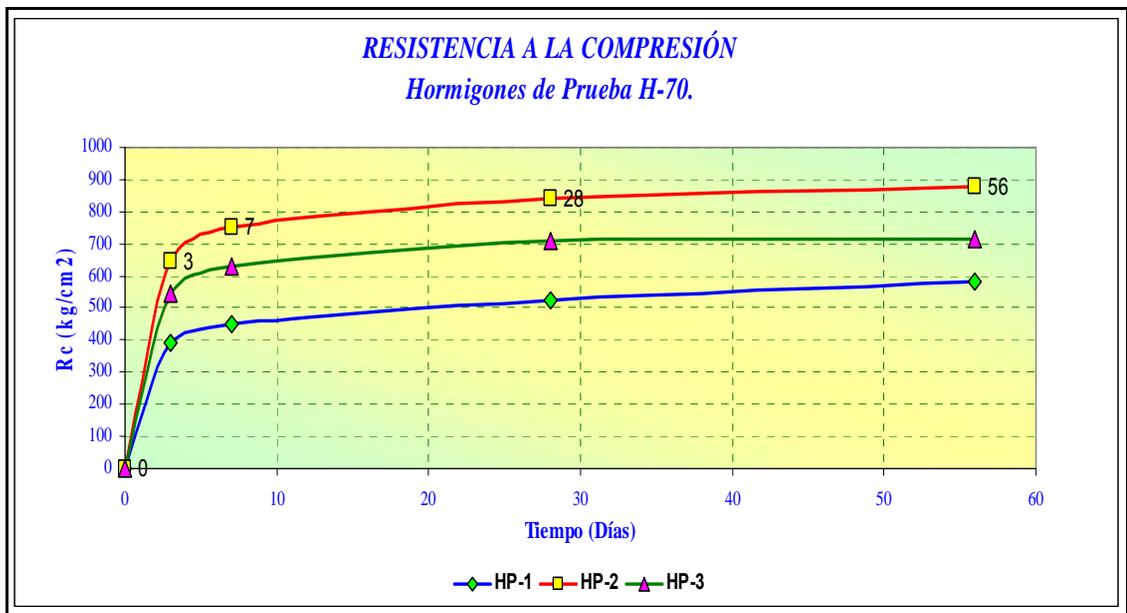


Gráfico N°6. Ganancia de resistencias a tempranas edades para Hormigones de Prueba H-70.

En este gráfico se puede apreciar de mejor forma la ganancia de resistencia a tempranas edades. Se observa claramente que el hormigón con nanosílice incorporada (HP-2), es el que alcanza las mejores resistencias, alcanzando 645 kg/cm² a los 3 días, que corresponde a un 92% de su resistencia especificada.

6.2. Relaciones De Resistencia.

6.2.1. Para hormigones H-30.

- **Relaciones de resistencia con respecto al hormigón patrón.**

Para realizar un mejor análisis es conveniente considerar porcentajes de aumento de resistencia en los hormigones con respecto al hormigón patrón.

Para esto se tomarán las resistencias obtenidas por el hormigón patrón (H30/HP-1) y se compararán con las resistencias de los demás hormigones de prueba de la experiencia realizada con los H30, en cuanto a porcentajes de aumento de resistencias a diferentes edades.

Características, de los Hormigones de Prueba H-30		Razón A/C	Razón A/C+Ms	Cono	R3 c/r a Patrón	R7 c/r a Patrón	R28 c/r a Patrón	R56 c/r a Patrón
HP-2	A1+ A2	0,40	-	6	1,01	1,15	1,16	1,13
HP-3	A1+ Nanosílice.	-	0,393	20	0,86	0,98	0,98	0,94
HP-4	A1+ Nanosílice.	-	0,323	13	1,21	1,29	1,29	1,20

Tabla N°22. Relaciones de resistencia con respecto al hormigón patrón, HP/ H-30.

En la tabla se observa que las resistencias obtenidas por el hormigón de Prueba N°2, (hormigón con incorporación de aditivo plastificante y mantenedor de cono) son siempre superiores a las del hormigón patrón. Esto se debe a la compatibilidad entre estos dos aditivos complementarios de última generación, potenciado su acción plastificante y reductora de agua, que entrega a los granos de cemento una carga eléctrica negativa, produciendo su separación y permitiendo con esto, una hidratación completa en el hormigón, lo que se traduce en mejores resistencias desde tempranas edades.

Las resistencias del hormigón de prueba N°3 (HP-3), resultan siempre más bajas que en el hormigón patrón, debido a la excesiva dosis de agua, que se

utilizó en esta prueba, originando burbujas y conductos internos (debido a la evaporación del agua), en la masa del hormigón, lo que tiene como consecuencia, pérdida en la resistencia, además de una excesiva trabajabilidad (cono 20 cm.)

Al reducir la dosis de agua en un 18% en el hormigón de prueba N°3 (de 4,25 a 3,50 litros), el hormigón de prueba N°4 (hormigón potenciado) experimenta una disminución en la trabajabilidad (cono 13 cm.) y un aumento en su resistencia, que se pueden medir como un 29 % de aumento en la resistencia a los 28 días, con respecto a la resistencia del hormigón patrón.

▪ **Relaciones de resistencia con respecto a la resistencia alcanzada por cada hormigón a los 28 días.**

En la siguiente tabla, se puede apreciar el aumento de la resistencia en el tiempo, alcanzado por los hormigones H-30, tomando como base la resistencia alcanzada por cada hormigón a la edad de 28 días.

Para las tres primeras mezclas la dosis de agua permanece constante, en la última mezcla la dosis se disminuye, para alcanzar la trabajabilidad requerida interior mina (cono 12).

Características, de los Hormigones de Prueba H-30		Razón A/C	Razón A/C+Ms	Cono	Relación Resistencia R3/R28	Relación Resistencia R7/R28	Relación Resistencia R56/R28
HP-1	Agua	0,40	-	3	0,63	0,82	1,13
HP-2	A1+ A2	0,40	-	6	0,55	0,81	1,11
HP-3	A1+ Nanosílice.	-	0,393	20	0,55	0,82	1,08
HP-4	A1+ Nanosílice.	-	0,323	13	0,59	0,82	1,06

Tabla N°23. Relaciones de resistencias, HP/ H-30.

Podemos observar que tanto el hormigón patrón (HP-1), como el hormigón de prueba N°2, presentan aumentos significativos en sus resistencias a los 56 días, con respecto a los 28 días (superior al 10%), bajo este concepto, se puede concluir que ambos hormigones deben seguir aumentando su resistencia más allá de los 56 días.

En cambio, para los hormigones de prueba N°3 y N°4 (con adición de nanosílice), el porcentaje de aumento con respecto a los 28 días, no es tan significativo (6 y 8% respectivamente), esto se puede explicar, debido a que la sílice en solución y los aditivos incorporados, desarrollan su mayor efecto a tempranas edades.

6.2.2. Para hormigones H-70.

- **Relaciones de resistencia con respecto al hormigón patrón.**

Para esto se tomarán las resistencias obtenidas por el hormigón patrón (H70/HP-1) y se compararán con las resistencias de los demás hormigones de prueba de la experiencia realizada con los H70, en cuanto a porcentajes de aumento de resistencias a diferentes edades, de esta forma, se comparan los hormigones de prueba con aditivos y adición con el hormigón patrón.

Características, de los Hormigones de Prueba H-70		Razón A/C+Ms	Cono	R3 c/r a Patrón	R7 c/r a Patrón	R28 c/r a Patrón	R56 c/r a Patrón
HP-2	A1+ Nanosílice.	0,27	16	1,64	1,67	1,61	1,51
HP-3	A3+ A4+ Microsílice.	0,31	12	1,38	1,40	1,36	1,23

Tabla N°24. Relaciones de resistencia con respecto al hormigón patrón, HP/ H-70.

Lo primero que se observa en esta tabla, es que los hormigones con aditivos y adiciones presentan un aumento significativo de las resistencias con respecto al hormigón patrón.

También se observa el mayor logro de resistencias en el hormigón con adición de nanosílice que con adición de microsílice.

El mayor aumento en la resistencia se produce a la edad de 7 días, con un 67% de ganancia en la resistencia si la comparamos con el hormigón patrón.

La microsílice y nanosílice, tienen un rango que puede llamarse “similar” en cuanto a tamaño de partículas, pero las primeras, al existir como una gran aglomeración de partículas y no como partículas aisladas, tienen una menor área efectiva de superficie en comparación con la sílice en solución (nanosílice), de allí la alta velocidad de reacción que presenta la nanosílice y las mayores resistencias que permite especialmente a tempranas edades.

Otro punto interesante de observar es que, aun cuando, la dosis de agua es menor para el hormigón de prueba N°2 (4,6 litros) con incorporación de nanosílice, este presenta una mejor trabajabilidad (cono 16), en comparación con el hormigón de prueba N°3 (dosis de agua = 5,4 litros) con microsílice (cono 12.)

- **Relaciones de resistencia con respecto a la resistencia alcanzada por cada hormigón a los 28 días.**

En la siguiente tabla se puede apreciar el aumento de la resistencia en el tiempo, alcanzada por los hormigones H-70, tomando como base la resistencia alcanzada por cada hormigón a una edad de 28 días.

Características, de los Hormigones de Prueba H-70		Razón A/C	Razón A/C+Ms	Cono	Relación Resistencia R3/R28	Relación Resistencia R7/R28	Relación Resistencia R56/R28
HP-1	Agua	0,34	-	5	0,75	0,86	1,11
HP-2	A1+ Nanosílice.	-	0,273	16	0,77	0,89	1,05
HP-3	A3+A4+ Microsílice.	-	0,310	12	0,76	0,88	1,00

Tabla N°25. Relaciones de resistencia, HP/ H-70.

Al observar la tabla, se aprecia que en el hormigón de prueba con adición de microsílice, la resistencia permanece constante, después de 28 días, esto se puede explicar, por que una parte de las micropartículas de sílice no se han disgregado completamente en el proceso mecánico de fabricación del hormigón, para su reacción con la cal hidratada del cemento, estos se encuentran aglomerados e imposibilitados de reaccionar, constituyendo solo un elemento inerte dentro del hormigón, no aportando al aumento de la resistencia. Como se muestra en el cuadro, después de 28 días el hormigón con adición de

microsílice, no experimenta aumento alguno en su resistencia.

Si bien es cierto, el aumento en la resistencia del hormigón con nanosílice no es tan significativo, en comparación con el hormigón patrón, se puede concluir que el hormigón de prueba N°2, debe seguir aumentando su resistencia después de los 56 días, en un porcentaje del orden de 5%.

6.2.3. Comparaciones entre hormigones patrones.

- **Relaciones de resistencia con respecto a la resistencia alcanzada por cada hormigón patrón a los 28 días.**

En el cuadro, se muestra las diferencias de resistencias alcanzadas por los hormigones patrones de las dos experiencias realizadas (hormigones patrones H30 y H70), tomando como base la resistencia alcanzada por cada hormigón a los 28 días, los que fueron confeccionados con diferentes dosificaciones.

Características, de los Hormigones PATRONES		Razón A/C	Relación Resistencia R3/R28	Relación Resistencia R7/R28	Relación Resistencia R56/R28
H30/HP-1	Agua	0,40	0,63	0,82	1,13
H70/HP-1	Agua	0,34	0,75	0,86	1,11

Tabla N°26. Relaciones de resistencia para hormigones patrones.

Se aprecia que hay una tendencia del hormigón patrón H-70, a alcanzar resistencias más elevadas a tempranas edades, (con respecto a su resistencia alcanzada a los 28 días), en comparación con el hormigón patrón H-30.

Pero esta tendencia cambia, notándose una recuperación del hormigón patrón H-30, después de los 28 días, que se puede medir como un 13% de aumento en la resistencia alcanzada a los 56 días, con respecto a su resistencia a los 28 días. En comparación con solo un 11% de aumento que sufre el hormigón

patrón con dosificación H-70.

Al notar los altos porcentajes en los cuales aumentan, ambos hormigones patrones, después de los 28 días, (superior al 10%), se puede concluir que ambos hormigones patrones deben seguir aumentando su resistencia, más allá de los 56 días.

6.3. Influencia Del Árido En La Obtención De Altas Resistencias.

Para los hormigones de alta resistencia, no siempre la pasta cementicia o la interfase pasta-agregado, son limitantes en la resistencia final del hormigón, sino las características mineralógicas y mecánicas del agregado.

Es por esta razón, que se realiza un análisis visual, para determinar como se produce la falla de la probeta, y así poder determinar la influencia de los áridos, en los hormigones de alta resistencia "H-70".

6.3.1. Rotura de probetas de hormigón patrón.

Las siguientes fotografías (fotografías N° 13 y 14) corresponden a roturas de probetas cúbicas de hormigones fabricadas sin adiciones ni aditivos y ensayadas a la compresión a los 56 días.

En estas probetas se observa que la falla a este nivel de resistencia, se transmite a través de la pasta de cemento, observándose gran cantidad de áridos intactos, también se puede atribuir la falla, a la mala adherencia entre el árido y la pasta de cemento, es decir, a un mal traspaso de tensiones a nivel de la interfase pasta-agregado, y que en forma visual puede observarse en aquellos áridos, en que su superficie original se muestra lisa.



Fotografía N°13 Probeta ensayada de Hormigón Patrón "H-70"

Esta fotografía corresponde a la probeta del hormigón de prueba patrón (H70/HP-1), que alcanzó la mayor resistencia a la compresión llegando a 581 kg/cm² a los 56 días de edad, en ella se observa una gran cantidad de áridos que permanece intacto después del ensayo, además del desprendimiento de algunas partículas de agregado, debido a una mala adherencia en la interfase pasta-agregado.



Fotografía N°14 Acercamiento a probeta de Hormigón Patrón "H-70"

Esta fotografía corresponde a la misma probeta, a la cual se le hizo un acercamiento, en ella se puede apreciar de mejor forma, la gran cantidad de áridos intactos.

6.3.2. Rotura de probetas de hormigón con Nanosílice.

Las siguientes fotografías (fotografías N°15 y 16) corresponden a roturas de probetas cúbicas, de hormigón fabricadas con sílice en solución (nanosílice) y ensayadas a los 56 días.



Fotografía N°15 Probeta ensayada, Hormigón de Prueba N°2 "H-70"



Fotografía N°16 Probeta ensayada, Hormigón de Prueba N°2 "H-70"

En estas fotografías se observa una notoria diferencia con respecto a las anteriores, en cuanto a que han aumentado considerablemente la cantidad de áridos fracturados ubicados en los planos de falla de la probeta, quedando casi ninguno sin romperse.

Estas fotografías corresponden a la probeta del hormigón de prueba con incorporación de Nanosílice (H70/HP-2), que alcanzó la mayor resistencia a la compresión llegando a 879 kg/cm² a los 56 días de edad, en ella se observa una gran cantidad de áridos fracturados y un muy bajo porcentaje de áridos desprendidos, se nota una matriz mucho mas compacta, en la cual trabajan en conjunto todos los componentes del hormigón, en consecuencia, la falla se produce a través del componente menos resistente, en este caso, a través del árido.

6.3.3. Rotura de probetas de hormigón con Microsílice.

Las siguientes fotografías (fotografías N° 17 y 18) corresponden a roturas de probetas cúbicas, de hormigón fabricadas con microsíllice y ensayadas a los 56 días.

En estas fotografías se observa que la falla a este nivel de resistencia se produce debido a una combinación entre el desprendimiento de los áridos ubicados en los planos de falla (que corresponde principalmente a aquellos en que su superficie se muestra lisa.) y áridos que se encuentra fracturados.



Fotografía N°17 Probeta ensayada, Hormigón de Prueba N°3 "H-70"

Esta fotografía corresponde a la probeta del hormigón de prueba con incorporación de microsíllice (H70/HP-3), que alcanzó la mayor resistencia a la compresión llegando a 713 kg/cm² a los 56 días de edad, en ella se observa que hay un mayor porcentaje de áridos desprendidos (enteros) que áridos fracturados, esto indica que la pasta cemento no tiene la resistencia suficiente o no hay una buena adherencia entre la interfase pasta-agregado.



Fotografía N°18 Probeta ensayada, Hormigón de Prueba N°3 "H-70"

Esta fotografía corresponde a un acercamiento de la probeta anterior, en ella se puede observar que hay tanto áridos fracturados como áridos enteros o desprendidos que se encuentran en los planos de falla.

Capítulo VII

CONCLUSIONES.

Las conclusiones que se obtienen en esta investigación se basan en los resultados obtenidos en los ensayos realizados y en los beneficios que le otorga a la división El Teniente, el cambio de Microsílice a Nanosílice.

7.1. Conclusiones Para Los Hormigones H-30.

1. La combinación de dos aditivos de última generación que se incorporaron al hormigón de prueba N°2, resultó adecuado para la obtención de docilidad y desarrollo de su resistencia mecánica. Esto se debe a la compatibilidad entre estos dos aditivos complementarios de última generación, potenciado su acción plastificante y reductora de agua, que entrega a los granos de cemento, una carga eléctrica negativa, produciendo su separación y permitiendo con esto, una hidratación completa en el hormigón, lo que se traduce en mejores resistencias desde tempranas edades.
2. El hormigón que presenta un mejor comportamiento durante todas las edades, es el hormigón de prueba N°4 (potenciado), esto se debe a que se trabajó en base a la dosificación del hormigón de prueba N°3, en lo referente a la razón agua/cemento para un descenso de cono 12, obteniendo como resultado un incremento de la resistencia. Esta colada alcanzó 484 kg/cm² a los 28 días de edad, lo que corresponde a una ganancia en la resistencia de un 11%, en comparación con el hormigón de prueba N°2 (435 Kg/cm²).

7.2. Conclusiones Para Los Hormigones H-70.

1. La mayor resistencia media obtenida por el hormigón patrón (HP1/H70) a la edad de 28 días fue de 522 kg/cm², lo que indica que se pueden obtener hormigones de alta resistencia sin la incorporación de aditivos y adiciones. Teniendo en cuenta el concepto de alta resistencia en Chile, como aquellos hormigones que superan los 50 MPa. (Ver capítulo II, “Definición de alta resistencia”).
2. El valor máximo de resistencia media a compresión a 28 días obtenido en los hormigones de alta resistencia fue de 840 kg/cm², con la utilización de nanosílice. En cambio la mayor resistencia promedio alcanzada por los hormigones en los cuales se utilizó microsílice fue de 710 kg/cm². Con lo cual se obtiene un 18% de ganancia en la resistencia, debido al cambio de Microsílice a Nanosílice.
3. El mayor aumento en la resistencia lo experimenta la colada con incorporación de nanosílice y se produce a la edad de 7 días, con un 67% de ganancia en la resistencia si la comparamos con el hormigón patrón. La microsílice y nanosílice, tienen un rango que puede llamarse “similar” en cuanto a tamaño de partículas, pero las primeras, al existir como una gran aglomeración de partículas y no como partículas aisladas, tienen una menor área efectiva de superficie en comparación con la sílice en solución (nanosílice), de allí la alta velocidad de reacción que presenta la nanosílice y las mayores resistencias que permite especialmente a tempranas edades.
4. En el hormigón de prueba con adición de microsílice, la resistencia permanece prácticamente constante, después de 28 días, esto se puede explicar, por que una parte de las micropartículas de sílice no se han disgregado completamente en el proceso mecánico de fabricación del hormigón, para su reacción con la Cal hidratada del cemento, estos se encuentran aglomerados e imposibilitados de reaccionar, constituyendo solo un elemento inerte dentro del hormigón, no aportando al aumento de la resistencia, después de 28 días el hormigón con adición de microsílice.
Si bien es cierto, el aumento en la resistencia del hormigón con nanosílice

no es tan significativo, en comparación con el hormigón patrón, se puede concluir que el hormigón de prueba N°2, debe seguir aumentando su resistencia después de los 56 días, en un porcentaje del orden de 5%.

5. Al hacer un análisis visual de las probetas ensayadas se puede apreciar lo siguiente:

En la probeta con incorporación de microsílíce, existe un mayor porcentaje de áridos desprendidos (enteros) que áridos fracturados, esto indica que la pasta cemento no tiene la resistencia suficiente o no hay una buena adherencia entre la interfase pasta-agregado.

Sin embargo, en la probeta con incorporación de nanosílíce, se observa una notoria diferencia, en cuanto a que han aumentado considerablemente la cantidad de áridos fracturados ubicados en los planos de falla de la probeta, (quedando casi ninguno sin romperse). Se nota una matriz muy compacta, en la cual trabajan en conjunto todos los componentes del hormigón, en consecuencia, la falla se produce a través del componente menos resistente, en este caso, a través del árido.

- ***Reducción de aditivos en el diseño.***

6. Un factor importante a destacar, es la disminución en un producto para el diseño de los hormigones H-70, antiguamente era necesario, la utilización de microsílíce en polvo mas un superplastificante y un mantenedor de cono.

Hoy en día con la utilización de la nanosílíce, solo es necesario el aditivo mantenedor de cono, ya que la combinación de la nanotecnología con moléculas especialmente seleccionadas producen una mayor plasticidad y trabajabilidad en el hormigón, que hace innecesario el uso de superplastificantes, disminuyendo el diseño en un producto (aditivo superplastificante), reduciendo los costos en la fabricación de los hormigones H-70.

▪ **Conclusiones de terreno.**

7. La nanosílice al estar en estado líquido, presenta una fácil homogeneización disminuyendo el tiempo de mezclado mecánico del hormigón, lo que se traduce en un aumento en la productividad de las plantas de hormigón.
8. Al hacer una inspección visual en las posturas de los hormigones de alta resistencia H-70, se observa que el hormigón es altamente trabajable casi auto-compactante, lo que trae como consecuencia la disminución en el personal para la compactación y posturas de estos hormigones.

▪ **Medio Ambiente.**

9. La microsílice al ser un polvo mucho más pequeño que el humo del cigarrillo, entra en los pulmones de los usuarios y queda atrapada en los alvéolos pulmonares. Con el tiempo produce fibrosis pulmonar, una enfermedad irreversible llamada silicosis. La nanosílice, a pesar de ser aún más pequeña, está en forma líquida precisamente para evitar este peligro, de esta forma se cuida el medio ambiente y la salud de los operadores. (ISO 14.001)

▪ **Seguridad**

10. Antiguamente con la utilización de la microsílice en polvo, era necesario que el operador, subiera a las instalaciones de la planta con una bolsa de microsílice (similar a las bolsas de cemento) y la distribuyera sobre una correa transportadora, para que esta fuera llevada al mezclador de la planta (ver fotografía N°19), con el correspondiente peligro de caída de altura y de contaminación del operador por estar en contacto directo con la microsílice.



Correa
Transportadora.

Fotografía N°19 Planta de hormigón interior mina.

Hoy en día, con la utilización de la nanosílice (sílice en estado líquido), el sistema es monitoreado a través de una cabina, en la cual el operador mediante un software maneja todos los componentes (materiales) del proceso de fabricación del hormigón.



Fotografía N°20 Monitoreo del proceso de fabricación del hormigón.

Los aditivos y adiciones líquidas por su parte, son almacenados en envases de 1000 litros y son llevados al mezclador de la planta por un sistema de bombeo, de esta forma se eliminan los riesgos de caída de altura y contaminación del operador, cumpliendo con las normativas y políticas de seguridad de la división.



Fotografía N°21 Envases de aditivos y adiciones.

▪ ***Hormigones de alto desempeño.***

11. Como consecuencia de un buen diseño, se ha observado según las experiencias realizadas y las inspecciones en terreno, que estos hormigones (con incorporación de nanosílice) no solo presentan simplemente alta resistencia sino que además poseen otras características como alta trabajabilidad, alta impermeabilidad, y una alta durabilidad. Con lo cual podemos clasificar a estos hormigones no solo como hormigones de alta resistencia (H.A.R.) si no como hormigones de alto desempeño (H.A.D.) u hormigones de altas prestaciones (H.A.P.). Concepto que se utiliza hoy en día para aquellos hormigones que se encuentran en condiciones altamente agresivas.

A modo de complemento para esta investigación, se entregan dos anexos, primero una evaluación estadística de la resistencia mecánica y luego información técnica del diseño y postura de las carpetas de hormigones de alta resistencia H-70.

Evaluación Estadística de la Resistencia Mecánica (NCh 1998 Of. 89.)

Se realiza una evaluación estadística al hormigón H-70, correspondiente al periodo de abril, mayo y junio del año 2005. Con el objetivo de determinar la conformidad de los resultados de las resistencias a compresión con respecto a la especificada, y evaluar el nivel del control de ensayo. Para esto el plan de muestreo en la división El Teniente, se realiza cada 50 m³, cumpliendo con lo especificado en la normativa correspondiente.

El control de calidad a los hormigones entregados a los pies de la obra por el proveedor (Hormigones PREMIX Ltda.) Según análisis estadístico por norma NCh 1998 Of. 85, califica el nivel de control desarrollado por esta empresa como “Excelente”. (Ver Evaluación Estadísticas de las Resistencias Mecánicas.)

DATOS DE INGRESO			
R28 Especificada (MPa)	70	Nº Muestras	37
Nivel de confianza (%)	90	Prob. Gemelas	2
Fracción defectuosa (%)	10	Colocación	Normal

Nº Orden	Fecha	GUIA Nº	RESISTENCIAS			Res.Ind fi	Res c/3 f3	Media fm	(fm-fi)2	Intervalo R
			R7	R28-1	R28-2					
1	02-04-05	52606	650	775	766	771		764	52	9
2	08-04-05	52615	620	755	760	758		764	34	5
3	09-04-05	52616	601	783	775	779	769	764	231	8
4	13-04-05	52619	612	749	758	754	764	764	96	9
5	18-04-05	52622	586	745	758	752	762	764	139	13
6	19-04-05	52623	590	783	775	779	762	764	231	8
7	20-04-05	52624	592	792	783	788	773	764	585	9
8	21-04-05	52625	624	753	762	758	775	764	34	9
9	21-04-05	52626	607	827	822	825	790	764	3744	5
10	21-04-05	52607	616	805	801	803	795	764	1536	4
11	23-04-05	52631	668	818	805	812	813	764	2322	13
12	25-04-05	52635	620	783	775	779	798	764	231	8
13	04-05-05	52648	618	766	773	770	787	764	38	7
14	04-05-05	52649	625	775	783	779	776	764	231	8
15	10-05-05	54260	629	753	760	757	769	764	46	7
16	11-05-05	54264	650	732	740	736	757	764	773	8
17	12-05-05	54265	564	732	743	738	744	764	666	11
18	13-05-05	54269	613	755	762	759	744	764	23	7
19	13-05-05	54268	633	732	740	736	744	764	773	8
20	15-05-05	54273	615	760	753	757	751	764	46	7
21	15-05-05	54272	590	753	749	751	748	764	164	4
22	22-05-05	54281	616	740	749	745	751	764	354	9
23	22-05-05	54282	636	740	751	746	747	764	317	11
24	26-05-05	54284	663	747	753	750	747	764	191	6
25	04-06-05	54294	604	801	792	797	764	764	1102	9
26	06-06-05	54296	621	755	760	758	768	764	34	5
27	06-06-05	54295	640	747	749	748	768	764	250	2
28	07-06-05	54297	625	766	762	764	757	764	0	4
29	07-06-05	54298	631	768	768	768	760	764	18	0
30	09-06-05	52502	668	783	775	779	770	764	231	8
31	15-06-05	52513	586	745	751	748	765	764	250	6
32	15-06-05	52514	600	760	764	762	763	764	3	4
33	16-06-05	52515	646	775	783	779	763	764	231	8
34	21-06-05	52521	583	723	732	728	756	764	1282	9
35	23-06-05	52526	605	749	758	754	754	764	96	9
36	24-06-05	52527	643	732	736	734	739	764	889	4
37	25-06-05	52528	608	766	753	760	749	764	15	13

			22898			28261	26743		17258	274
			fm 7			fm28	fm c/3		Des Tip (S)	Inter prom
			618,9			763,8	764,1		21,89	7,41
			37			37	35		36	37

CRITERIO DE CONTROL, SEGÚN LA NORMA NCh 1998 of 89

Empresa: PREMIX

Hormigones, Planta Interior Mina.

Periodo: Abril, Mayo, Junio del 2005.-

Tipo de	70	MPa	Nº Total de Muestras:	37	
Nivel de	90	%	Fracción Defectuosa:	10	%
Tamaño	20	mm	Colocación Con:	Normal	

A.- POR GRUPO DE MUESTRAS CONSECUTIVAS (Solo si N >= 10)

a)	$f_3 \geq f_c + k_1$	73,9	\geq	70	+	0	=	70	Bien, ! Cumple !
b)	$f_i \geq F_o$ $f_o = F_c - K_2$	72,8	\geq	70	-	3,5	=	66,5	Bien, ! Cumple !

CONCLUSIÓN:

- El Hormigón CUMPLE con la Resistencia Especificada

Datos :

	Valor	Unid
f_3 = Resist. Mín. c/3 muestras consecutivas.	73,9	MPa
f_c = Resist. Espec. a Rotura por Compresión.	70	MPa
f_i = Resist. Individual mínima (Prom. c/ muestra)	72,8	MPa
f_o = Límite inferior para la Resist f_i , de c/muestra.	66,5	MPa
k_1 = Constante de evaluación para f_3 , (Tabla N°3)	0	MPa
k_2 = Constante de evaluación para f_i (Tabla N°3)	3,5	MPa
S = Desviación Normal de Resist. individuales f_i .	2,19	MPa
t = Factor estadístico (Ver tabla 4)	1,282	S/U
f_m = Resistencia Media aritmética (del Lote).	76,4	MPa

Condiciones Previs-
tas para la ejecución
de la Obra
! Muy Buenas !

B.- POR LOTE TOTAL DE MUESTRAS

a)	$f_m \geq f_c + (t$	76,4	\geq	70	+	2,8	=	72,8	Bien, ! Cumple !
b)	$f_i \geq F_o$ $f_o \geq F_c - K_2$	72,8	\geq	70	-	3,5	=	66,5	Bien, ! Cumple !

CONCLUSIÓN:

- El Hormigón CUMPLE con la Resistencia Especificada

EVALUACIÓN DEL NIVEL DE CONTROL DE ENSAYO

Nota:

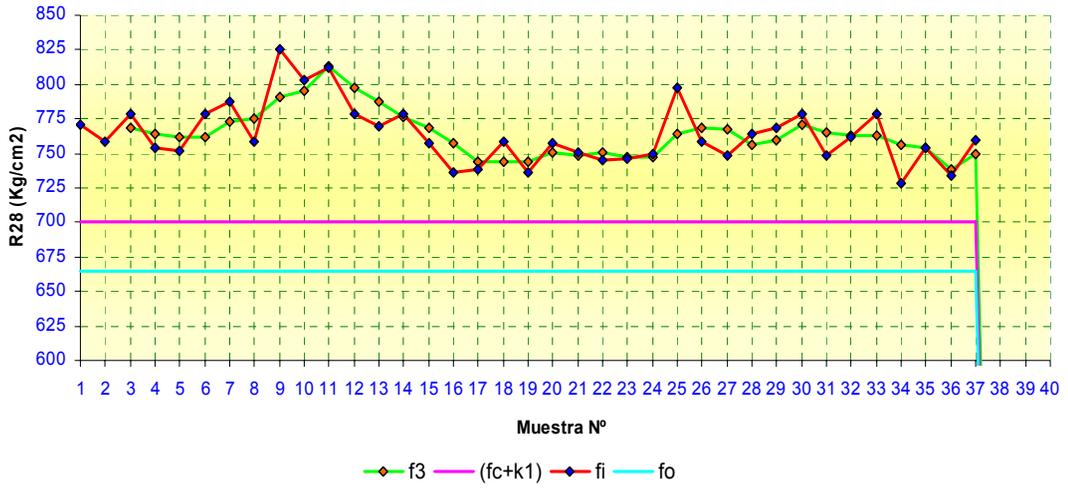
La evaluación del de control de ensayo, permite establecer la dispersión del laboratorio de control.

Esta evaluación se realizará solamente si se dispone por lo menos de 10 muestras distintas de hormigón, con resultados de ensayos de dos o más probetas cada una.

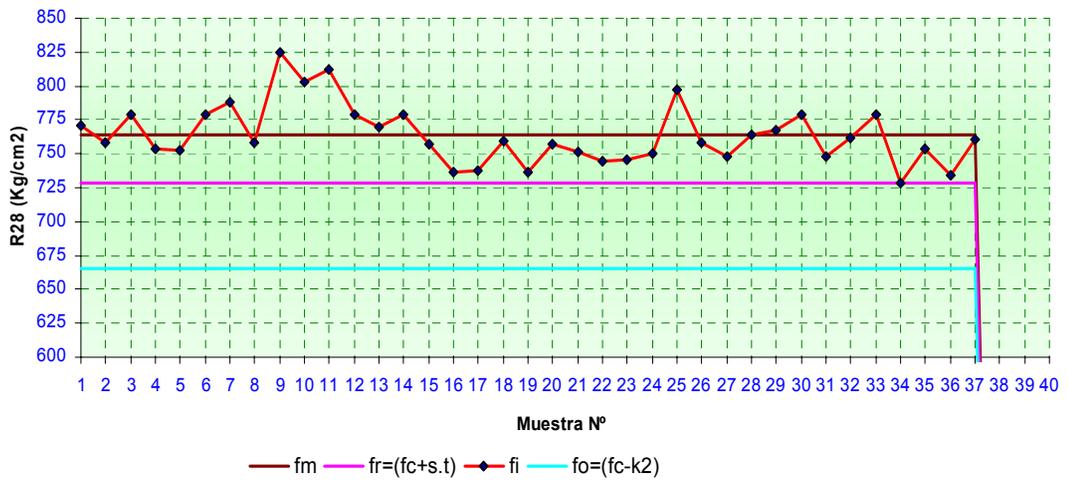
	Valor	Unidad
R= Intervalo Promedio	7,41	s/u
d2= Factor de calculo para S	1,128	s/u
S1= Desviación Normal de E	6,6	kg/cm2
f_m = Resist. Media aritmética	763,8	kg/cm2
V1= Coeficiente de Variación	0,86	%

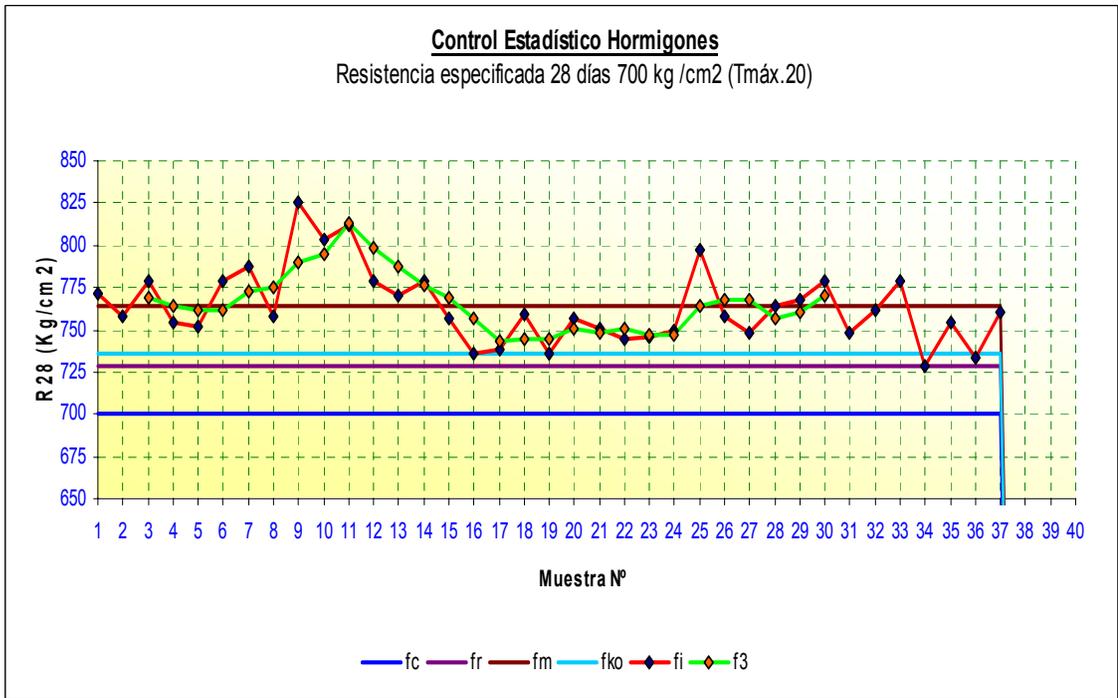
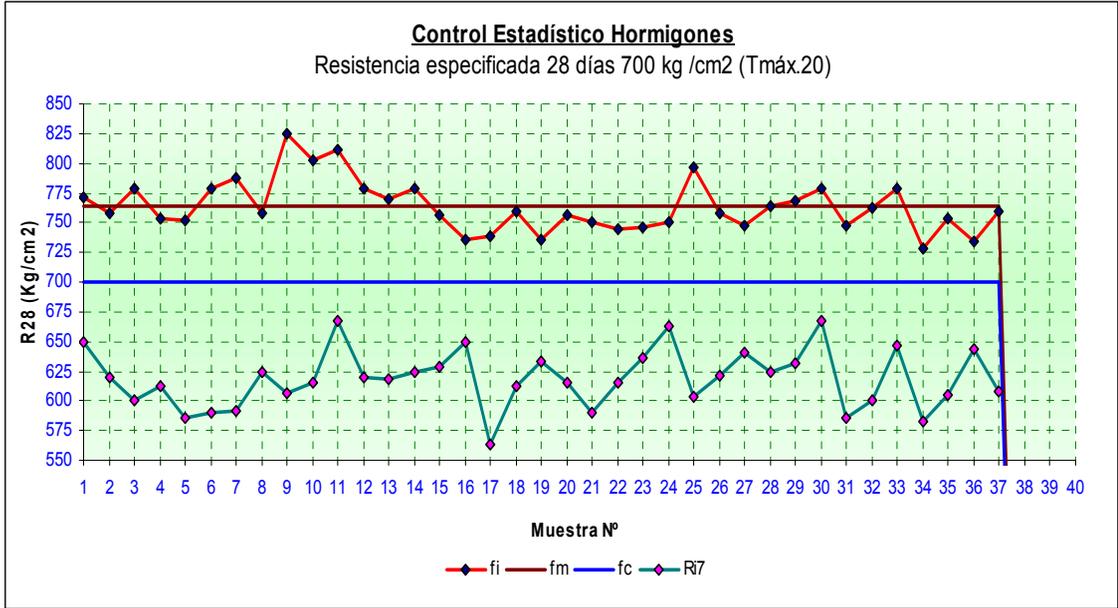
CONCLUSIÓNPor lo tanto la Evaluación del Control de Ensayo es, **! Excelente !**

Control Estadístico Hormigones
Por Grupo de Muestras Consecutivas



Control Estadístico Hormigones
Por Lote Total de Muestras





Posturas De Hormigón H-70.

1.1. Soporte del pavimento

Al tratarse de una mina subterránea tenemos una capacidad de soporte, proporcionado por la roca, prácticamente inmejorable. Prueba de ello es que en los pavimentos constructivos en la mina no se ha producido ninguna falla de tipo estructural hasta la fecha.

Aprovechando la experiencia anterior, no se considera necesaria la construcción de una base con características estructurales, si no mas bien, lo que se requiere es una carpeta nivelante que supla las irregularidades propias del piso de roca, las cuales tienen su origen en el desarrollo de las galerías.

1.2. Juntas de pavimento de hormigón.

Como se sabe existen cuatro tipos de juntas en pavimentos rígidos de hormigón, estos son.

- Juntas transversales de dilatación.
- Juntas transversales de contracción.
- Juntas transversales de construcción.
- Juntas longitudinales.

En el interior de la mina, dada la inercia térmica de la montaña, las condiciones interiores son relativamente constantes, es decir, si bien la temperatura y humedad varían a lo largo del año, no se producen variaciones importantes entre el día y la noche como ocurre en el exterior. En la mina El Teniente, dependiendo un poco del sector, encontramos que la temperatura varia entre 10 y 15°C entre invierno y verano.

Dadas las condiciones descritas, para efectos de diseño de los pavimentos nos preocuparemos solo de los siguientes tipos de juntas:

- Juntas transversales de contracción (retracción).
- Juntas trasversales de construcción.

Las juntas longitudinales no se consideran puesto que las carpetas de rodado están constituidas por una sola calzada del ancho de la galería.

1.2.1. Juntas transversales de contracción.

Las juntas transversales de contracción tienen como función básica, la de controlar la formación de grietas y fisuras derivadas de la retracción del hormigón durante su proceso de endurecimiento.

Estas juntas controlan además el efecto del alabeo, cuando la losa se contrae uniformemente por una disminución de temperatura media o de su contenido de humedad, aparecen por roce con la subrasante tensiones de tracción. Colocando juntas transversales a distancias apropiadas, estas tensiones quedan reducidas a límites admisibles. En el caso del alabeo la junta actúa como una articulación imperfecta, reduciendo así la luz libre de flexión.

Considerando que las juntas de dilatación o no existen o se tienden a separar excesivamente, es recomendable proyectar estas juntas de contracción y alabeo a poca distancia.

Lo anterior es la teoría general que corresponde a la situación de diseño y construcción de carreteras, donde las condiciones ambientales son las corrientes. Para nuestro caso el problema del alabeo no es una determinante, dada la constancia de la temperatura y humedad. Por lo tanto debemos preocuparnos solamente de la retracción del fraguado del hormigón.

La forma de combatir la retracción por fraguado es evitar la pérdida del agua de amasado. Esta pérdida puede producirse por una o más de las siguientes causas:

- Exceso de cemento.
- Áridos absorbentes.
- Exudación más evaporación.

Todos estos aspectos pueden ser controlados mediante una buena dosificación, corregida por humedad, un buen control durante la construcción y curado del hormigón.

1.2.2. Juntas transversales de construcción.

Cuando se ejecuta una interrupción planificada de la pavimentación, esta debe hacerse en un lugar de coincidencia con una junta normal de construcción. En

un pavimento de carretera deben colocarse barras de traspaso de carga, sin embargo, en atención a la excelente capacidad de soporte presente en la mina y a la experiencia que se ha logrado durante muchos años, estas barras pueden ser eliminadas dejando por precaución una unión endentada, la cual sería suficiente para absorber pequeñas contracciones de los paños de hormigón.

Por otro lado, dado el alto número de juntas transversales de construcción que se requieren, ya que las faenas de hormigonado en el interior de la mina son bastante lentas, se eliminan las juntas de contracción, haciendo que las primeras jueguen un doble papel.

1.3. CONSTRUCCIÓN DE LA CARPETA DE RODADO.

Consiste en la preparación del piso de las calles para su posterior colocación de la carpeta de rodado, hormigonado de base H-15 y hormigonado de carpeta H-70. Estos trabajos se realizan una vez materializadas las referencias topográficas en terreno, es decir, ejes y gradientes.

Limpieza del terreno.

Una vez revisado el nivel del piso, se escarpará y se limita todo a roca viva, si hubiesen sub-excavaciones estas se rebajarán con tornillo hidráulico o retroexcavadora.

Hormigones de base H-15.

Una vez limpiado el terreno, se procede a la colocación del hormigón de nivelación del grado H-15. (H15(90)20/08)

Cuando el hormigón de nivelación termine su fraguado (8 horas), se inician los trabajos de colocación de moldajes, se debe tener especial cuidado en la cota y pendientes, ya que estas son las referencias para la cota del hormigón terminado.

Hormigones de carpeta H-70

El hormigón H-70 (H70(90)20/16) se transporta desde la planta existente en la rampa de acceso mina Esmeralda hasta su lugar de colocación en camiones

mixer de bajo perfil.

Una vez ubicado el camión mixer en el lugar de colocación se procede a vaciar el hormigón, donde se enraza y compacta con un vibrador adecuado para distribuir y compactar el hormigón en forma uniforme. En los espacios reducidos la compactación se realiza con vibrador de menor tamaño.

Su colocación se realiza en paños de 3 metros, distancias que se materializarán las juntas de construcción, para la colocación de un nuevo paño la superficie de la junta de construcción se limpiará en toda su superficie y se pintara con una pintura asfáltica altamente impermeabilizante y anticorrosiva, para su protección contra las aguas agresivas.

Las juntas de retracción se realizan mediante el aserrado de una hendidura en el pavimento. Utilizándose disco de diamante para hormigón, esta junta se realiza cuando el hormigón alcance una edad de 24 horas, y se ubican a tres metros de las juntas de construcción.

La profundidad que debe alcanzar el material sellante en la junta es como mínimo el ancho producido por el espesor del disco de diamante.

Con respecto al curado y protección del hormigón:

- Las carpetas se curan de 8 a 10 días con agua superficial, luego se dejan sin agua, hasta los 28 días, para ser entregadas al tránsito normal.
- En el caso donde existan filtraciones de aguas desde el techo de las galerías (aguas ácidas-sulfatadas), los hormigones se protegen inmediatamente terminado el proceso de afinado superficial de la carpeta, para esto se utiliza polietileno con el que se recubren los hormigones como mínimo durante 12 horas.

BIBLIOGRAFÍA.

1. ACI MATERIALS JOURNAL / Marzo-Abril 1987. Influencia De La Lluvia Ácida En Las Estructuras De Hormigón.
2. AİTCIN, P.C; NEVILLE, A. 1996. High-Performance Concrete Demystified. American Concrete Institute, Compilation 32.
3. BUCHAS, J.; BUCHAS, F. 1992. Hormigones De Alta Performance- Un Nuevo Desafío Tecnológico Para La Construcción En La Presente Década. IX Jornadas Chilenas del Hormigón. La Serena, Chile.
4. DUPOUY O., G. D. 1991. Hormigones y Morteros de Alta Resistencia en Base al Uso de Silicafume. Tesis. Universidad Austral de Chile. Fac. de Ciencias de la Ingeniería. 180 Pág.
5. FERNÁNDEZ C; GUTIÉRREZ A. 1994. Selección De Materiales Para La Fabricación De Hormigones De Alta Resistencia. España.
6. FERRADA, M.; ESCOBAR, M.; DOMINGUEZ, W.; AVALOS, P. 2003. U-sílíce... Sílice a Favor del Medio Ambiente... ISO 14.001. XIV Jornadas Chilenas del Hormigón. Valdivia, Chile.
7. MONTENEGRO A., M. 1993. Hormigones De Muy Alta Resistencia. Santiago. Chile.
8. MORALES L., J. M. 2000. Hormigones De Muy Alta Resistencia. Tesis. Universidad de Chile. Fac. de Cien y Mat. 127 Pág.
9. SEPÚLVEDA W., B. 1990. Pavimentos En Medios Subterráneos Agresivos. Tesis. Universidad de Chile. Fac. de Cien y Mat. 150 Pág.
10. SOLAS A., A.; MATURANA B., P.; BUSTOS M., J; MONTEGO S., J. 1992. Los Hormigones De Alta Resistencia Y La Potencialidad De Sus Componente. Pontificia Universidad Católica de Chile. IX Jornadas Chilenas del Hormigón. La Serena, Chile.
11. VÉLIZ A., S. A. 1997. Hormigones De Alta Resistencia. Tesis. Universidad de Chile. Fac. de Cien y Mat. 72 Pág.

NORMATIVA CHILENA.

- NCh 170 Of. 85. Hormigón - “Requisitos generales”
- NCh 171 EOf. 85. Hormigón - “Extracción de hormigón fresco”
- NCh 1018 EOf.77. Hormigón - “Preparación de mezclas de prueba en laboratorio”
- NCh 1019 EOf.74. Hormigón - “Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de abrams”
- NCh 1037 Of.77. Hormigón - “Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”
- NCh 1443 Of.78. Hormigón - “Agua de amasado- Muestreo”
- NCh 1498 Of.82. Hormigón - “Agua de amasado- Requisitos”
- NCh 1564 Of.79. Hormigón - “Determinación de la edad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco”
- NCh 163 Of.79. Áridos para morteros y hormigones – “Requisitos generales”
- NCh 164 EOf.76. Áridos- “Extracción y preparación de muestras”.
- NCh 165 Of.77. Áridos- “Tamizado y determinación de la granulometría”.
- NCh 1116 Of.77. Áridos- “Determinación de la densidad aparente”.
- NCh 1117 Of.77. Áridos- “Determinación de la densidad real y neta y la absorción de aguas de las gravas”.
- NCh 1223 Of.77. Áridos- “Determinación del material fino, menor que 0,08 mm”.
- NCh 1239 Of.77. Áridos- “Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de arenas”.
- NCh 1325 Of.78. Áridos- “Determinación del equivalente de arena”.
- NCh 1326 Of.77. Áridos- “Determinación de huecos”.
- NCh 1327 Of.77. Áridos- “Determinación de partículas desmenuzables”.