



Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias de la Ingeniería
Escuela Ingeniería en Construcción

CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO BLANCO

**Tesis para optar al título de:
Ingeniero Constructor.**

Profesor Guía:

Sr. José Arrey Díaz.

Constructor Civil, especialidad Hormigones.

Experto en Prevención de Riesgos Ocupacionales.

GIOVANA DAMARIS NAVARRETE ANABALÓN

VALDIVIA — CHILE

2006

Dedicada a quienes más amo...
A mis padres Flor y Cipriano,
A mis hermanos y sobrinos,
A mi novio Jorge,
A Dios.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dar las gracias a mi familia, en especial a mis padres, por su enorme esfuerzo y constante apoyo durante todos estos años.

A mi pololo Jorge, que me acompañó y apoyó durante todos mis años de Universidad. Gracias, Te Amo.

También quisiera agradecer el importante respaldo recibido por parte de mi profesor guía don José Arrey Díaz. Gracias por su tiempo, confianza e importante colaboración.

De forma muy especial deseo agradecer a Leo, Marcelo y Rodrigo, del laboratorio LEMCO, por su buena disposición e importante ayuda durante la realización de mis ensayos.

ÍNDICE

- RESUMEN

- SUMMARY

- INTRODUCCIÓN

- OBJETIVOS

	PÁG.
CAPÍTULO I: CEMENTO	1
1.1.- ASPECTOS GENERALES	1
1.2.- COMPOSICIÓN DEL CEMENTO	3
1.2.1.- MATERIAS PRIMAS	3
1.3.- PROCESO DE FABRICACIÓN	6
1.3.1.- PRIMERA ETAPA – OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	7
1.3.2.- SEGUNDA ETAPA – FABRICACIÓN DEL CLINQUER	8
1.3.3.- TERCERA ETAPA – MOLIENDA DE CEMENTO	10
1.4.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS — PROPIEDADES DEL CEMENTO	11
1.5.- CEMENTOS FABRICADOS EN CHILE	15
1.5.1.- COMPOSICIÓN	15
1.5.2.- CLASIFICACIÓN	16
CAPÍTULO II: CEMENTO BLANCO	23
2.1.- GENERALIDADES	23
2.2.- COMPOSICIÓN	24
2.2.1.- MATERIAS PRIMAS	24
2.2.2.- COMPONENTES QUÍMICOS	25
2.2.3.- COMPONENTES SECUNDARIOS	28
2.3.- FABRICACIÓN	28
2.3.1.- PROCESO DE ELABORACIÓN – PREPARACIÓN MECÁNICA	29
2.4.- CONTROL DEL COLOR – BLANCURA Y GRADUACIÓN DEL CEMENTO BLANCO	36

CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA – PROCESO DE CARACTERIZACIÓN **44**

3.1.- GENERALIDADES	44
3.2.- METODOLOGÍA DE TRABAJO	44
3.3.- MATERIALES UTILIZADOS	45
3.3.1.- CEMENTOS	45
3.3.2.- ÁRIDOS	46
3.3.3.- AGUA	47
3.4.- ACONDICIONAMIENTO	47
3.5.- ENSAYOS	48
3.5.1.- DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA NORMAL DE LA PASTA DE CEMENTO	48
3.5.2.- DETERMINACIÓN DE LOS TIEMPOS DE FRAGUADO INICIAL Y FINAL DE LA PASTA DE CEMENTO	51
3.5.3.- DETERMINACIÓN DE LA TRABAJABILIDAD DEL MORTERO DE CEMENTO – MÉTODO ASENTAMIENTO DEL CONO (CONO REDUCIDO)	52

CAPITULO IV: RESULTADOS **60**

4.1.- CONSISTENCIA NORMAL DE LA PASTA DE CEMENTO	60
4.2.- TIEMPOS DE FRAGUADO INICIAL Y FINAL DE LA PASTA DE CEMENTO	61
4.3.- TRABAJABILIDAD DEL MORTERO DE CEMENTO – MÉTODO DEL ASENTAMIENTO DEL CONO	63
4.4.- RESISTENCIAS MECÁNICAS DEL MORTERO DE CEMENTO	64
4.4.1.- RESULTADOS ENSAYO DE RESISTENCIAS A LA FLEXIÓN	64
4.4.2.- RESULTADOS ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL MORTERO DE CEMENTO.	67

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES **70**

- ANEXO A

- BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁG
TABLA 1-1.- COMPOSICIÓN DE ÓXIDOS EN EL CLINQUER DE CEMENTO GRIS.	7
TABLA 1-2.- CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS SEGÚN SU COMPOSICIÓN.	18
TABLA 1-3.- CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS SEGÚN SU RESISTENCIA.	18
TABLA 1- 4.- CLASES DE CEMENTOS PRODUCIDOS POR CEMENTERAS NACIONALES	19
TABLA 1- 5.- CARACTERÍSTICAS DE LOS CEMENTOS Y ENSAYOS NORMALIZADOS.	21
TABLA 2-1.- COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CLINQUER BLANCO Y GRIS DE CEMENTO DE PORTLAND	27
TABLA 2-2.- MINERALES PRINCIPALES DEL CLINQUER DE CEMENTO PORTLAND	34
TABLA 4-1.- RESULTADOS ENSAYO DE CONSISTENCIA NORMAL DE LAS PASTAS	60
TABLA 4-2.- RESULTADOS ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL INICIO Y TÉRMINO DE FRAGUADO DE LAS PASTAS DE CEMENTO.	61
TABLA 4-3.- EVOLUCIÓN DEL PROCESO DE FRAGUADO. PENETRACIONES MEDIDAS DESDE EL FONDO DEL MOLDE.	62
TABLA 4-4.- RESULTADOS ENSAYO DE TRABAJABILIDAD DEL MORTERO DE CEMENTO (ASENTAMIENTO DEL CONO).	63
TABLA 4-5.- VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE EL ASENTAMIENTO DEL CONO (TRABAJABILIDAD) DE LOS CEMENTOS BLANCOS RESPECTO DE LOS CEMENTOS GRISES.	64
TABLA 4-6.- RESULTADOS ENSAYO DE RESISTENCIAS A LA FLEXIÓN DEL MORTERO DE CEMENTO.	65
TABLA 4-7.- VARIACIÓN PORCENTUAL DE LA FLEXIÓN DE LOS CEMENTOS BLANCOS C/R AL CEMENTO GRIS CORRIENTE.	65
TABLA 4-8.- VARIACIÓN PORCENTUAL DE LA FLEXIÓN DEL CEMENTO BLANCO C/R AL CEMENTO GRIS ALTA RESISTENCIA.	66
TABLA 4-9.- RESULTADOS ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL MORTERO DE CEMENTO.	67
TABLA 4-10.- VARIACIÓN PORCENTUAL DE LA RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN DE LOS CEMENTOS BLANCOS C/R AL CEMENTO GRIS CORRIENTE.	68

TABLA 4-11.- VARIACIÓN PORCENTUAL DE LA RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN DE LOS CEMENTOS BLANCOS C/R AL CEMENTO GRIS ALTA RESISTENCIA	68
---	----

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	PÁG
GRÁFICO 4-1.- PORCENTAJES DE AGUA DE CONSISTENCIA NORMAL REQUERIDA POR LOS CEMENTOS BLANCOS EN RELACIÓN A LOS CEMENTOS GRISES.	60
GRÁFICO 4-2.- PENETRACIONES Y DESARROLLO DEL PROCESO DE FRAGUADO DE CEMENTOS BLANCOS Y GRISES.	63
GRÁFICO 4-3.- EVOLUCIÓN DE LAS RESISTENCIAS A ESFUERZOS DE FLEXIÓN	65
GRÁFICO 4- 4.- EVOLUCIÓN DE LAS RESISTENCIA A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN	67
GRÁFICO 5-1.- TIEMPOS DE FRAGUADO INICIAL Y FINAL DE LOS CEMENTOS BLANCOS RESPECTO DE LOS MÍNIMOS EXIGIDOS POR LA NCH 148.	71
GRÁFICO 5-2.- RESISTENCIAS A LA FLEXIÓN DE LOS CEMENTOS BLANCOS RESPECTO DE LOS MÍNIMOS EXIGIDOS POR LA NCH 148.	72
GRÁFICO 5-3.- RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN DE LOS CEMENTOS BLANCOS RESPECTO DE LOS MÍNIMOS EXIGIDOS POR LA NCH 148.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁG
IMAGEN 2-1.- HORMIGÓN PIGMENTADO	39
IMAGEN 2-2.- VISTA PANEL ARQUITECTÓNICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO.	40
IMAGEN 2-3.- LECHADA PIGMENTADA EN BASE A CEMENTO BLANCO.	41
IMAGEN 2-4.- AZULEJOS ENLAZADOS CON CEMENTO BLANCO	42
IMAGEN 2-5.- ADOQUINES DE CEMENTO BLANCO.	42
IMAGEN 3-1.- PREPARACIÓN PASTA NORMAL DE CEMENTO BLANCO (1)	49
IMAGEN 3-2.- PREPARACIÓN PASTA NORMAL DE CEMENTO BLANCO (2)	49
IMAGEN 3-3.- VACIADO PASTA NORMAL DE CEMENTO BLANCO AL MOLDE TRONCO - CÓNICO	50
IMAGEN 3-4.- ENRASADO	50
IMAGEN 3-5.- APARATO DE VICAT Y SONDA TETMAYER	50
IMAGEN 3-6.- APARATO DE VICAT Y AGUJA DE VICAT	52
IMAGEN 3-7.- PREPARACIÓN DE MORTERO NORMAL (MÉTODO MEZCLADO MANUAL)	53
IMAGEN 3- 8.- MEDICIÓN DEL ASENTAMIENTO DEL CONO	54
IMAGEN 3-9.- LLENADO DE MOLDES RILEM	55
IMAGEN 3-10.- COMPACTACIÓN MANUAL	56
IMAGEN 3-11.- ENRASADO DE MOLDES RILEM	56
IMAGEN 3-12.- MOLDE IDENTIFICADO Y CONSERVADO EN CÁMARA HÚMEDA	57
IMAGEN 3-13.- PROBETAS DESMOLDADAS Y SUMERGIDAS EN AGUA	57
IMAGEN 3-14.- PRENSA CBR PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN	58
IMAGEN 3-15.- MÁQUINA PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN	59
IMAGEN 3-16.- ENSAYO DE COMPRESIÓN	59

RESUMEN

Determinar las propiedades del cemento blanco y evaluar su desempeño respecto del cemento gris convencional son el objetivo central de esta tesis.

Se analizaron los cementos blancos de las marcas comerciales Tolteca, Huascarán y Puma, el estudio incluyó además, el análisis de los cementos grises de grado corriente Bio-Bio y de alta resistencia Melón.

El proceso de caracterización se guió por los métodos que establece la normativa chilena de clasificación y control de calidad del cemento "NCh 148.Of68".

Mediante la preparación de pastas de cemento con distintas proporciones de agua, se determinó la cantidad de agua necesaria para alcanzar la consistencia normal de cada una de las pastas; Con las dosis de agua resultantes de la prueba de consistencia normal, se prepararon pastas de cemento de consistencia normal a las cuales se midió los tiempos de inicio y fin de fraguado ; Se evaluó la trabajabilidad en cinco mezclas de mortero normal en estado fresco, según el método de asentamiento del cono (cono reducido); Finalmente se realizaron pruebas para evaluar las resistencias a la flexión y compresión en 75 probetas cúbicas de mortero normal después de 3, 7, 14, 21 y 28 días de preparadas.

El estudio permitió distinguir las siguientes diferencias entre el comportamiento de aglomerantes blancos y grises: Se comprobó que los cementos blancos solicitan menores dosis de agua para alcanzar la consistencia normal, desarrollan su proceso de fraguado en un menor tiempo, poseen una mayor trabajabilidad y que, a excepción del aglomerante blanco Puma, desarrollan altas resistencias mecánicas.

SUMMARY

To determine the properties of the white cement and to evaluate its performance respect to the conventional gray cement are the central objective of this thesis.

The white cements were analyzed from the trademarks Tolteca, Huascarán and Puma. In addition the study included the analysis of gray cements in the current Bio - Bio and high resistance degree Melon.

The characterization process was guided by the methods that the Chilean classification norm and quality control of cements "NCh 148.Of68" establish.

Through the pastes preparation with different water doses, it was determined the necessary amount of water to reach the normal consistency of each cement pastes; With the water doses resulting from the normal consistency test, cement pastes of normal consistency were prepared in which process the Times of setting were measured. The workability was evaluated in five mixtures of normal mortar in fresh condition according to the reduction cone method. Finally several tests were made to evaluate the Flexion and Compression resistance in 75 cubical normal mortar tubes after 3, 7, 14, 21 and 28 days of being prepared.

The study allowed distinguishing the existing differences between the behavior of white and gray folders, it was verified that white cements need less water doses to reach the normal consistency and they develop their forge process in a smaller time, they have a great workability with the exception of the white cement Puma, they develop high mechanical resistances.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de incrementar las alternativas disponibles en torno a los sistemas cementantes aumenta día a día; exigencias ambientales, económicas, energéticas y también exigencias técnicas así lo imponen. Ante este escenario, el cemento ha presentado en los últimos años una notable evolución que ha desterrado el concepto de cemento multipropósito, y hoy es posible hablar de cementos especializados, que difieren del propósito general de la producción masiva por que adaptan sus características a las necesidades específicas del usuario y del proyecto generando beneficios que permiten lograr resistencias estructurales adecuadas y acelerar los procesos constructivos.

Una variedad clasificada para "uso especial" es el Cemento Blanco; éste, que durante años fue utilizado solamente como fragua o pegamento para cerámica, se presenta en la actualidad como un material vanguardista capaz de satisfacer las exigencias de la construcción actual, desarrollando altas resistencias mecánicas además del valor agregado que le otorgan sus cualidades estéticas y decorativas.

Factores como su costo, susceptiblemente más alto al cemento gris (casi el doble), ocasionado por la exhaustividad de su proceso productivo, materias primas y a los gastos que genera su importación; además del reemplazo de su uso tradicional como mortero de pega por morteros especializados, han determinado que su consumo en nuestro país represente apenas el 1% del consumo total de cemento.

Sin embargo, el importante desarrollo económico de nuestro país, ha permitido más audacia y mayores exigencias en los proyectos constructivos, poco a poco los profesionales chilenos se suman a la tendencia mundial en

arquitectura y construcción que apuesta por la utilización del cemento blanco; en este sentido, ampliar el campo de conocimiento acerca del producto sin duda resulta de suma eficacia; la Caracterización de las propiedades de esta variedad de aglomerante, se presenta como una herramienta capaz de proporcionarnos la información necesaria acerca de los procesos, además de validar la calidad real del producto, constatando el cumplimiento de las exigencias técnicas establecidas por la normativa chilena.

En razón de lo anterior, esta memoria de título se concentra en el estudio y caracterización de tres tipos de Cemento Blanco, mediante los métodos y normativas de control de calidad del cemento, dirigidos sobre la base de la caracterización de morteros de cemento, abordando además, la evaluación de sus propiedades respecto de las que posee el cemento gris convencional en sus variedades corriente y de alta resistencia.

OBJETIVOS

— Objetivo general:

- Caracterizar el Cemento Blanco, determinando sus propiedades más significativas; y evaluar su desempeño respecto del cemento gris convencional.

— Objetivo específico:

- Realizar los ensayos correspondientes, basados en la Norma Chilena Oficial NCh 148.Of68, tendientes a determinar en tres variedades comerciales de cemento blanco, las siguientes propiedades físicas:

—Consistencia Normal.

—Tiempos de Inicio y Fin de Fraguado.

—Trabajabilidad.

—Resistencias Mecánicas.

- Simultáneamente y en igualdad de condiciones determinar las mismas propiedades en los cementos grises de grados corriente y alta resistencia, a fin de constatar las diferencias más relevantes en el comportamiento de aglomerantes blancos y grises.

CAPÍTULO I

CEMENTO

1.1.- Aspectos Generales

El cemento es un material inorgánico finamente pulverizado, de color gris o blanco que, al agregarle agua, ya sea sólo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad. Cuando el cemento es mezclado con agua y arena forma mortero, y cuando es mezclado con arena y piedras pequeñas forma una piedra artificial llamada concreto.

En sentido genérico, el cemento se puede definir como un material con propiedades adhesivas y cohesivas que le dan la capacidad de unir fragmentos sólidos, para formar un material resistente y durable. Esta definición incluye gran cantidad de materiales cementantes como las cales, los asfaltos, etc. No obstante, los cementos que más importan desde el punto de vista de la tecnología del concreto son los cementos calcáreos que tengan propiedades hidráulicas, es decir, que desarrollen sus propiedades (fraguado y adquisición de resistencia) cuando se encuentran en presencia de agua, como consecuencia de la reacción química entre los dos materiales.

El cemento posee diversas aplicaciones, como la obtención de hormigón por la unión de arena y grava con cemento (es el más usual), para pegar superficies de distintos materiales o para revestimientos de superficies a fin de protegerlas de la acción de sustancias químicas. El cemento tiene diferentes composiciones para usos diversos. Puede recibir el nombre del componente principal, como el cemento calcáreo, que contiene óxido de silicio, o como el cemento epoxiaco, que contiene resinas epoxídicas; o de su principal

característica, como el cemento hidráulico o el cemento rápido. Los cementos utilizados en la construcción se denominan en algunas ocasiones por su origen, como el cemento romano, o por su parecido con otros materiales, como el caso del cemento Portland, que tiene cierta semejanza con la piedra de Portland, utilizada en Gran Bretaña para la construcción. Los cementos que resisten altas temperaturas se llaman cementos refractantes.

El denominado cemento Portland, fue patentado^{1,1} en 1824 y desde finales del siglo XIX el hormigón, producto basado en el cemento Portland, se ha convertido en uno de los materiales de construcción más apreciados. Los cementos Portland típicos consisten en mezclas de silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) y silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) en diversas proporciones, junto con pequeñas cantidades de compuestos de hierro y magnesio. Para retardar el proceso de endurecimiento se suele añadir yeso.

Los compuestos activos del cemento son inestables, y en presencia de agua reorganizan su estructura. El endurecimiento inicial del cemento se produce por la hidratación del silicato tricálcico, el cual forma una sílice (dióxido de silicio) hidratada gelatinosa e hidróxido de calcio. Estas sustancias cristalizan, uniendo las partículas de arena o piedras —siempre presentes en las mezclas de argamasa de cemento — para crear una masa dura. El aluminato tricálcico actúa del mismo modo en la primera fase, pero no contribuye al endurecimiento final de la mezcla. La hidratación del silicato dicálcico actúa de modo semejante, pero mucho más lentamente, endureciendo poco a poco durante varios años. El proceso de hidratación y asentamiento de la mezcla de cemento se conoce como curado, y durante el mismo se desprende calor.

^{1,1} El inglés Joseph Aspdin obtuvo en 1824 una patente para un cemento que él produjo en su cocina. El inventor calentó una mezcla de piedra caliza y de arcilla en la estufa de su cocina y molió la mezcla la que finalmente resultó en un polvo de cemento hidráulico que endurece con la adición de agua. Aspdin nombró el producto que produjo como Cemento Portland porque una vez fraguado presentaba un color similar a la piedra sacada en la isla de Portland en la costa británica.

El proceso productivo del cemento comienza con la extracción de las materias primas (calizas y arcillas) desde canteras mediante perforaciones y voladuras. Posteriormente, las piezas extraídas pasan por procesos de trituración y molienda, mezclándose con diversos elementos adicionales como hierro, yeso, escoria, arena u otros. El resultado del proceso de molienda, previo paso por silos de homogenización es el "crudo", que en un horno rotatorio se somete a temperaturas superiores a los 1450° centígrados, para obtener el "clinker". Dependiendo de los niveles de clinker y otros elementos adicionales (escoria, sílice, puzolana, caliza, filler calcárea, entre otros) y a los porcentajes utilizados de los mismos en la composición del producto final los cementos pueden ser catalogados bajo diferentes tipos, los que pueden ser divididos genéricamente en cementos grises y cementos blancos, la mayoría de los cementos comercializados en Chile y a nivel mundial corresponde a cementos grises.

1.2.- Composición del cemento

1.2.1.- Materias Primas

—Caliza (carbonato de calcio CaCO_3)

La caliza es una roca sedimentaria menos compacta que el mármol, compuesta en su mayoría por carbonato cálcico. Es muy abundante y su origen puede ser orgánico o químico. Otros componentes presentes en su composición son el óxido de hierro, fósiles y otros minerales, estos componentes son necesarios para la formación del clinker en las etapas posteriores.

Para obtener la caliza existen diferentes métodos de extracción, ya sea a tajo abierto (sobre el manto terrestre), o como también por métodos subterráneos. Este último método es escaso y costoso pero a diferencia del otro

método (a tajo abierto), la caliza extraída es mas pura, siendo de mejor calidad. En Chile, existe solo un yacimiento subterráneo llamado Mina Navio, ubicado en Calera y que pertenece a Cementos Melón.

La caliza es la roca más importante en la fabricación del cemento proporcionando el óxido de calcio (CaO),

—Arcillas, (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃)

La arcilla es un mineral procedente de la descomposición de rocas que contienen feldespato^{1,2} por ejemplo granito, originada en un proceso natural que demora decenas de miles de años. Físicamente se considera un coloide^{1,3}, de partícula extremadamente pequeña y superficie lisa. Químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es Al₂O₃-2SiO₂-2H₂O.

Se caracteriza por adquirir plasticidad al mezclarla con agua, y también sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800° C.

Las arcillas se forman esencialmente por sílice, por alúmina y por hierro. Su contenido es variable de una arcilla a otra. Las arcillas utilizadas están constituidas generalmente por varios minerales en proporciones variables. La arcilla proporciona SiO₂ y Al₂O₃.

—Yeso

Piedra natural, muy suave, de color blanco y rica en sulfatos de calcio que, en pequeña proporción, se adiciona en la fabricación del cemento para que actúe como retardador de fraguado.

^{1,2} Los feldespatos son grupos de minerales constituyentes fundamentalmente de las rocas ígneas aunque pueden encontrarse en cualquier tipo de roca. Los feldespatos corresponden a los silicatos de aluminio y de calcio, sodio o potasio, o mezclas de esas bases.

^{1,3} Coloide, es un sistema físico compuesto por dos fases: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas, por lo general sólidas, de tamaño mesoscópico (es decir, a medio camino entre los mundos macroscópico y microscópico). Así, se trata de partículas que no son apreciables a simple vista, pero mucho más grandes que cualquier molécula.

— Adiciones (Puzolana, escoria, etc.)

Las puzolanas son materiales silíceos o aluminosilíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

Los principales tipos de puzolanas son:

Puzolanas Naturales

- Rocas volcánicas, en las que el constituyente amorfo es vidrio producido por enfriamiento brusco de la lava. Por ejemplo las cenizas volcánicas, la piedra pómez, las tobas, la escoria.
- Rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo^{1,4}, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos de lo cual son ejemplos las tierras de diatomeas^{1,5}, o las arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.

Puzolanas Artificiales

- Cenizas volantes: Las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral, fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.
- Arcillas activadas o calcinadas artificialmente: Por ejemplo residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.

^{1,4} El ópalo es un gel producto de deposición de aguas termales, encontrándose en nódulos concrecionales en algunas rocas sedimentarias. Forma el esqueleto de algunos animales y plantas, siendo a menudo el elemento fosilizador de estas últimas.

^{1,5} Las diatomeas son algas unicelulares, que cuando mueren, los restos de su esqueleto se depositan en los lechos acuíferos en capas masivas. En esos lechos encontramos el material fosilizado, que se denomina diatomea, con una envoltura silícica externa que hace que su forma se conserve de manera permanente e indestructible.

- Escorias de fundición: Principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.

—Correctores

Muchas veces es necesario equilibrar determinados componentes (óxidos) empleando otros materiales que contengan el óxido que se desea corregir.

1.3.- Proceso de fabricación

Existe una gran variedad de cementos según la materia prima base y los procesos utilizados para producirlo, que se clasifican en procesos de vía seca y procesos de vía húmeda. La elección de una u otra vía está condicionada esencialmente por el contenido de agua de las materias primas disponibles.

—Todos los procesos tienen las siguientes etapas o sub-procesos en común:

- **Etapas I: Obtención y Preparación de las materias primas.**
- **Etapas II: fabricación del clínquer (calizas + arcillas + correctores).**
- **Etapas III: molienda de cemento (clínquer + yeso + adición).**

1.3.1.- Primera etapa – Obtención y Preparación de las Materias Primas

El proceso de fabricación del cemento comienza con la obtención de las materias primas necesarias para conseguir la composición deseada de óxidos metálicos para la producción de clínquer. Calizas, arcillas, arena, mineral de hierro y yeso se extraen de canteras o minas y, dependiendo de la dureza y ubicación del material, se aplican ciertos sistemas de explotación y equipos. Una vez extraída la materia prima es reducida a tamaños que puedan ser procesados por los molinos de crudo.

— El clínquer se compone de los siguientes óxidos (datos en %) (Tabla 1-1.-).

Tabla 1-1.- Composición de óxidos en el clínquer de cemento gris.

Óxido	Fórmula	Cantidad (%)
Óxido de calcio "Cal"	CaO	60 – 69
Óxido de silicio	SiO ₂	18 – 24
Óxido de aluminio "Alumina"	Al ₂ O ₃	4 – 8
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	1 – 8

Fuente: www.ieca.es/fabcemento

La obtención de la proporción adecuada de los distintos óxidos se realiza mediante la dosificación de los minerales de partida:

- Caliza para el aporte de CaO.
- Arcilla para el aporte del resto óxidos.

Las materias primas son transportadas a la fábrica de cemento donde se descargan para su almacenamiento.

La prehomogenización realizada mediante diseños adecuados del apilamiento y la extracción de los materiales en los almacenamientos reduce la variabilidad de los mismos.

Los estudios de composición de los materiales en las distintas zonas de cantera y los análisis que se realizan en fábrica permiten dosificar la mezcla de materias primas para obtener la composición deseada.

1.3.2.- Segunda etapa – Fabricación del Clinquer

— Tratamiento de las Materias Primas, (Calizas + Arcillas + Correctores)

Dependiendo de la naturaleza de las materias primas y de las condiciones en que llegan a la planta de cemento, pueden sufrir uno o varios tratamientos primarios como:

- Horneado.
- Chancado.
- Homogeneización.
- Secado.
- Almacenamiento en cancha de acuerdo a características físicas.

—Dosificación de las materias primas

Las características y la calidad del clinquer, dependen de los compuestos mineralógicos, es decir, del porcentaje en que está presente cada uno de los óxidos antes mencionados.

Es así que la dosificación de las materias primas estará condicionada al tipo de clinquer que se desea producir y de las características mineralógicas de las materias primas.

—Molienda de crudo

La molienda de las materias primas tiene por objeto reducirlas de tamaño a un estado pulverulento, para que puedan reaccionar químicamente durante la clínquerización, al mismo tiempo que se obtiene el mezclado de los distintos materiales.

—Homogeneización

La homogeneización puede ser por vía húmeda o por vía seca, dependiendo de si se usan corrientes de aire o agua para mezclar los materiales. Consiste en mezclar los distintos materiales, a tal punto que en cualquier punto de la mezcla que se tome, deben estar presentes los componentes en las proporciones previstas. El material es llevado por medio de bandas transportadoras o molinos, con el objetivo de reducir su tamaño hasta el orden de diámetro de medio milímetro. En ésta etapa se establece la primera gran diferencia de los sistemas de producción del cemento, (procesos por vía húmeda y procesos por vía seca, dependiendo de si se usan corrientes de aire o agua para mezclar los materiales). En el caso de la utilización de calizas de alta ley el proceso se realiza por vía seca, es decir, mediante silos de homogeneización, donde el crudo se agita por la inyección de aire comprimido en patios de materia prima con el uso de maquinarias especiales. En este proceso el control químico es más eficiente y el consumo de energía es menor, ya que al no tener que eliminar el agua añadida con el objeto de mezclar los materiales, los hornos son más cortos y el clínker requiere menos tiempo sometido a las altas temperaturas. En el proceso húmedo la mezcla de materia prima es bombeada a balsas de homogeneización y de allí hasta los hornos en donde se produce el clínker a temperaturas superiores a los 1500 °C.

—Clinkerización

Los materiales homogeneizados se calientan en el horno, hasta llegar a la temperatura de fusión incipiente (1400 a 1500°C). Para calcinar los materiales se pueden utilizar hornos verticales u hornos rotatorios, siendo estos últimos los más usados. A la salida del horno el enfriamiento del clínquer se hace con aire que pasa a través de sistemas de parrilla móvil, o bien, a través de tubos planetarios que giran solidarios al horno. De estos sistemas el clínquer sale con una temperatura inferior a los 150°C.

1.3.3.- Tercera etapa – Molienda de Cemento

La molienda consiste en reducir el clínquer, yeso y otros componentes a un polvo fino de tamaño inferior a 150 micrones. La molienda se realiza en molinos de bolas, que consisten en tubos cilíndricos divididos en dos o tres cámaras que giran a gran velocidad con diversos tamaños de bolas en su interior. Existen dos tipos de procesos de molienda:

- **Abierto:** En que el material entra por un extremo y sale terminado por el otro extremo.
- **Cerrado:** El material entra por un extremo y sale por el otro extremo hacia un separador que devuelve las partículas gruesas al molino.

El producto que completó su etapa de fabricación en el molino de cemento, es almacenado en silos de hormigón, los cuales disponen de equipos adecuados para mantener el cemento en agitación y así se evita la separación por decantación de los granos gruesos o la aglomeración.

—Envasado

El cemento se puede despachar en bolsas de papel o a granel. Las bolsas de papel deben cumplir con ciertos requisitos de resistencia e impermeabilidad. El transporte a granel se hace por lo general en depósitos metálicos y herméticos, en cuyo caso la descarga se realiza con inyección de aire.

- Bolsas de papel 42.5 kg.
- Granel en camión silo.

1.4.- Características Físicas — Propiedades del Cemento

La mayor parte de especificaciones para el cemento limitan su composición química y sus propiedades físicas. La comprensión del significado de algunas de estas propiedades físicas es útil para interpretar los resultados de las pruebas que se efectúan al cemento. En general, las pruebas de las propiedades físicas del cemento deben ser utilizadas exclusivamente para evaluar las propiedades del cemento más que para el concreto.

—Finura

La finura se define como la medida o tamaño de las partículas que componen el cemento; se expresa en cm^2/gr . lo cual llamamos superficie de contacto o superficie específica. La finura del cemento es su característica física principal, ya que como las reacciones de hidratación se producen en la superficie de los granos, sucede que cuanto más pequeño son éstos, más rápido es el desarrollo de la resistencia así, un cemento de alta resistencia inicial puede obtenerse con sólo moler más fino el mismo clínquer de un cemento corriente.

Este aumento de resistencia es notable a edades tempranas; pero con el tiempo los cementos portland de distinta finura tienen igual resistencia.

La finura de la molienda influye también en el calor de hidratación, que se desarrolla más rápidamente en los cementos más finos. La mayor finura confiere mayor trabajabilidad al hormigón a igual dosis de agua; en esas condiciones los cementos más finos tienen el inconveniente de su mayor retracción, pero ésta queda compensada en la práctica, pues a igual trabajabilidad exigen menos agua, y ésta influye en la retracción. Por otra parte, los cementos más finos tienen menos exudación.

Los efectos que una mayor finura provoca sobre la resistencia se manifiestan principalmente durante los primeros siete días.

—Expansión Autoclave

Se refiere a la capacidad de una pasta endurecida para conservar su volumen después del fraguado. La expansión destructiva retardada o falta de sanidad es provocada por un exceso en las cantidades de cal libre o de magnesia. Casi todas las especificaciones para el cemento portland limitan los contenidos de magnesia, así como la expansión registrada en la prueba de autoclave. Desde que en 1943 se adoptó la prueba de expansión en autoclave (ASTM C 151), prácticamente no han ocurrido casos de expansión anormal que puedan atribuirse a falta de sanidad.

—Consistencia Normal

Al agregar agua al cemento se produce una pasta (cemento mas agua), contiene fluidez a medida que se le va aumentando el contenido de agua. La consistencia normal es un estado de fluidez alcanzado por la pasta del cemento que tiene una propiedad óptima de hidratación. Se expresa como un porcentaje en peso o volumen de agua con relación al peso seco del cemento.

W agua / W cemento = % Consistencia Normal.

Por ejemplo 30% de la consistencia significa que por cada 100gr de cemento hay que agregar el 30% de agua.

Durante el ensayo de cemento, se mezclan pastas de consistencia normal, misma que se define por una penetración de 6 ± 1 mm de la aguja de Vicat, mientras se mezclan morteros para obtener ya sea una relación agua-cemento fija o para producir una cierta fluidez dentro de un rango dado. Ambos métodos, el de consistencia normal y el de la prueba de fluidez sirven para regular los contenidos de agua de las pastas y morteros respectivamente, que serán empleados en pruebas subsecuentes. Ambos permiten comparar distintos ingredientes con la misma penetración o fluidez.

—Tiempo de fraguado

El fraguado se define como el cambio de estado físico que sufre una pasta desde la condición blanda hasta la rigidez; Para determinar si un cemento fragua de acuerdo con los tiempos especificados en la norma NCh 152, se efectúan pruebas usando el aparato de Vicat o la aguja de Gillmore. El fraguado inicial de la pasta de cemento no debe ocurrir demasiado pronto; el fraguado final tampoco debe ocurrir demasiado tarde. Los tiempos de fraguado indican si la pasta esta desarrollando sus reacciones de hidratación de manera normal. El yeso regula el tiempo de fraguado en el cemento. También influyen sobre el tiempo de fraguado la finura del cemento, la relación agua-cemento, y los aditivos usados. Los tiempos de fraguado de los concretos no están relacionados directamente con los tiempos de fraguado de las pastas debido a la pérdida de agua en el aire (evaporación) o en los lechos y debido a las diferencias de temperatura en la obra en contraste con la temperatura controlada que existe en el laboratorio.

—Resistencias Mecánicas — Flexión y Compresión

Los cementos deben ser capaces de conferir resistencias iguales o superiores a las determinadas por las normas, en probetas preparadas con un mortero cuyos componentes, fabricación, conservación y ensayos están normalizados (NCh 158 Of67). La norma chilena utiliza estas probetas para realizar el ensayo de flexotracción y las dos partes resultantes luego se ensayan a compresión.

—Pérdida por Calcinación

La pérdida por calcinación del cemento portland se determina calentando una muestra de cemento de peso conocido a 900 °C a 1000°C hasta que se obtenga un peso constante. Se determina entonces la pérdida en peso de la muestra. Normalmente una pérdida por calcinación elevada indica prehidratación y carbonatación, que pueden ser causadas por un almacenamiento prolongado e inadecuado o por adulteraciones durante el transporte y la descarga.

—Peso Específico

El peso específico expresa la relación entre la muestra de cemento y el volumen absoluto.

$$\text{Peso específico} = m / V \text{ absoluto.}$$

Donde; m = muestra del cemento,

V absoluto = Volumen de la materia sólida.

El peso específico del cemento debe estar entre 3.10 a 3.15 gr. /cm³. El valor del peso específico no indica la calidad de un tipo de cemento, sino que su

valor es usado para el diseño de la mezcla. Con el valor del peso específico se pueden encontrar otras características del concreto.

Para determinar el peso específico del cemento existen cuatro métodos: Método De Le Chetalier, Método de Schuman, Método de Candlot, Método Picnómetro, todos los métodos anteriores tienen la misma finalidad , que es determinar el volumen del líquido que desplaza una cantidad de cemento, el líquido no debe reaccionar con el cemento.

1.5.- Cementos fabricados en Chile

1.5.1.- Composición

La norma NCh 148. Of68 señala con respecto a la composición de los distintos cementos fabricados en Chile, que todos ellos contienen como base de su composición, en porcentaje variable de uno a otro, clínquer portland, las adiciones minerales puzolana y escoria, completan el porcentaje faltante según el tipo de cemento.

—Clínquer Portland

Producto intermedio en la fabricación del cemento, principal componente de este último. Se trata del producto obtenido por calcinación a 1.500°C de una mezcla de caliza y arcilla finamente molida en proporciones adecuadas, formada principalmente por óxidos de calcio (CaO) y silicio (SiO₂) y por óxidos de aluminio (Al₂O₃) y fierro (Fe₂O₃) en proporciones menores.

—Adiciones

- **Puzolana**

Es un material silíceo-aluminoso que aunque no posee propiedades aglomerantes por sí solo, las desarrolla cuando está finamente dividido y en presencia de agua, por reacción química con hidróxido de calcio a temperatura ambiente.

- **Escoria**

Es el Producto que se obtiene por enfriamiento brusco de la masa fundida no metálica que resulta del tratamiento del mineral de hierro en alto horno. Este producto tiene como constituyentes principales silicatos y sílico-aluminatos de calcio y su composición química cumple los requisitos establecidos en norma chilena NCh 148.

1.5.2.- Clasificación

La norma NCh 148. Of68 establece dos clasificaciones para los cementos, según su composición y su resistencia:

1.5.2.1.- Clasificación según su composición

La norma NCh 148, clasifica a los cementos en cinco clases, de acuerdo a su composición.

—Clase Portland

- **Cemento Portland:** es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer y yeso y que puede aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado.

—Clase Siderúrgico

- **Cemento Siderúrgico:** es el cemento cuya composición es escoria básica de alto horno en proporciones comprendidas entre el 30% y 75% del producto terminado.
- **Cemento Portland Siderúrgico:** es el cemento cuya composición será escoria básica granulada de alto horno en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado.

—Clase con agregado tipo A

Cemento con Agregado tipo A: Es el cemento en cuya composición entrará el agregado tipo A^{1,6} en una proporción comprendida entre el 30% y el 50% en peso del producto terminado.

- **Cemento Portland con Agregado tipo A:** Es el cemento en cuya composición entrará agregado tipo A, en una proporción no superior a 30% en peso del producto terminado.

—Clase Puzolánico

- **Cemento Puzolánico:** es el cemento cuya composición contendrá puzolana en una proporción comprendida entre el 30% y 50% en peso del producto terminado.
- **Cemento Portland Puzolánico:** es el cemento en cuya composición entrará puzolana en una proporción no superior al 30% en peso del producto terminado.

^{1,6} Según definición de la norma NCh 148. Of68, el agregado tipo A, es una mezcla de sustancias compuestas de un material calcáreo arcilloso, que ha sido calcinado a una temperatura superior a 900° C y otros materiales a base de óxidos de silicio, aluminio y fierro.

—Clase para Usos Especiales

- **Cemento con Fines Especiales:** Es el cemento en cuya composición entraran los productos que se empleen normalmente en la fabricación de cementos, cuyos requisitos y propiedades se establecen por acuerdo previo entre productor y consumidor para cumplir determinados fines.

Tabla 1-2.- Clasificación de los Cementos según su Composición.

Denominación	Proporción de los componentes		
	Clinker	Puzolana	Escoria
Portland	100%	–	–
Portland Puzolánico	$\geq 70\%$	$\leq 30\%$	–
Portland siderúrgico	$\geq 70\%$	–	$\leq 30\%$
Puzolánico	50 - 70%	30 - 50%	–
Siderúrgico	25 - 70%	–	30 - 75%

Fuente: Compendio tecnología del hormigón.

1.5.2.2.- Clasificación según su resistencia

La norma NCh 148, clasifica a los cementos en dos grados, Corriente y de Alta resistencia, según sea su resistencia mínima a la compresión a los 28 días.

Tabla 1-3.- Clasificación de los cementos según su resistencia.

Cemento grado	Tiempo de Fraguado		Resistencia mínima a la compresión		Resistencia mínima a la flexión	
	Inicial mín. (min)	Final máx (hr.)	7 días (kg/cm ²)	28 días (kg/cm ²)	7 días (kg/cm ²)	28 días (kg/cm ²)
Corriente	60	12	180	250	35	45
Alta resistencia	45	10	250	350	45	55

Fuente: Nch 148.Of68 "Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales".

1.5.2.3.- Producción Nacional

En nuestro país, la capacidad instalada para la producción de cemento es cercana a los 7 millones de toneladas anuales y el consumo bordea los 4 millones de toneladas, el mercado está repartido históricamente en tres grandes consorcios productores: Melón, que desde el año 2000 pertenece a la francesa Lafarge; Polpaico, cuyos accionistas principales son el grupo suizo Holcim (antes denominado Holderbank) y la compañía chilena Gasco; y Cementos Bío-Bío, de capitales nacionales (grupos Briones, Rozas y otros socios).

—Los tipos de cemento comercializados en Chile según empresa productora nacional, se detallan a continuación en la tabla 1- 4.-:

Tabla 1- 4.- Clases de cementos producidos por cementeras nacionales

Clase	Composición	Marca	Grado
Portland	Clinker	Super Melón	Alta resist.
		Polpaico Portland	Alta resist.
Portland Puzolánico	Clinker y hasta 30% de puzolana	Melón especial	Corriente
		Polpaico especial	Corriente
		Melón extra	Alta resist.
		Polpaico 400	Alta resist.
		Inacesa alta resist.	Alta resist.
Puzolánico	Clinker y 30 - 50% de puzolana	Inacesa especial	Corriente
Siderúrgico	Clinker y 30 - 75% de escoria de alto horno	Bio Bio especial	Corriente
		Bio Bio Alta resist.	Alta resist.

Fuente: Grupo Polpaico S.A., Cementos Bio-Bio S.A., Melón S.A.

1.5.2.4.- Análisis de Calidad

De la calidad del cemento dependen la resistencia y la perpetuidad de las obras. El parámetro más importante a estudiar y controlar es la dosificación del cemento, por este motivo, el cemento debe ser sometido a un control de calidad que permita verificar que, a pesar de las variaciones que puede tener, sus propiedades generales se mantengan dentro de los límites que establece la Norma Chilena Oficial del Cemento, o en caso contrario, para establecer las medidas correctivas adecuadas.

El control de calidad es realizado en Chile por dos organismos privados, el IDIEM (Instituto de Investigaciones y ensayos de materiales, dependiente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile), y el DICTUC (Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile). Estos organismos entregan certificación de conformidad de cementos, puzolanas, cenizas, cales, yesos y aditivos, de acuerdo a normas nacionales e internacionales, mediante la realización de ensayos físicos, mecánicos y químicos de clínquer, cemento, puzolana, cal, yeso, aditivos, áridos y mortero. Ambas instituciones realizan sus controles regidos por la Norma Chilena Oficial del Cemento.

1.5.2.4.1- Ensayos del Cemento

➤ **En el polvo:**

- Densidades (real)
- Finura
- Composición química

➤ **En la pasta:**

- Agua de consistencia normal
- Tiempos de fraguado
- Estabilidad volumétrica
- Calor de hidratación
- Poder de retención de agua

➤ **En el mortero:**

- Compresión
- Flexotracción
- Deformaciones - cambios volumétricos

En la tabla 1- 5.- se indican las características de mayor importancia y los ensayos respectivos, con la correspondiente norma chilena o extranjera en caso de no existir la primera.

Tabla 1- 5.- Características de los cementos y ensayos normalizados.

Característica	Ensayo	
	Norma	Valor especificado
Peso específico	NCh 154	3,0 kg/dm ³ (C. Portland)
Tiempo de fraguado	NCh 152	Ver tabla 1-2
Consistencia normal	NCh 151	Nota (1)
Finura sist. Blaine	NCh 159	Nota (1)
Finura sist.Wagner	NCh 149	Nota (1)
Finura tamizado	NCh 150	Nota (1)
Resistencias	NCh 158	Ver tabla 1-1
Calor de Hidratación	ASTM C 186	4%. Nota (2)
Expansión autoclave	NCh 157	Máx. 1%

Fuente: Normas chilenas control de calidad del cemento.

Nota (1): La norma no especifica valores.

Nota (2): La norma ASTM C 186, especifica la medición del calor de hidratación mediante un ensayo por disolución en ácido fluorhídrico.

CAPÍTULO II

CEMENTO BLANCO

2.1.- Generalidades

El cemento blanco es una variedad de cemento portland que se fabrica a partir de materias primas cuidadosamente seleccionadas de modo que prácticamente no contengan hierro, manganeso ni cromo, u otros materiales que le den color.

El descubrimiento de su producción fue hecho a mediados del siglo veinte por los laboratorios de la empresa cementera y de materiales de construcción Lafarge^{2,1} en Francia.

Sus ingredientes básicos son la piedra caliza, base de todos los cementos, el caolín (una arcilla blanca que no tiene ningún óxido de hierro, pero si mucha alúmina) y yeso. Esta diversa composición, sin embargo, no trajo ningún cambio en las características intrínsecas de este cemento, que continuó proporcionando las mismas capacidades de resistencia que un cemento gris.

Su color "blanco" se consigue por medio de un proceso de elaboración química. En dicho proceso, una selección severa de las materias primas y un método de producción tecnológicamente avanzado salvaguardan la blancura inicial de la caliza en el producto final: el cemento blanco.

El bajo contenido de álcalis en su composición química, le permite la utilización de agregados tales como el vidrio volcánico, y algunas rocas que normalmente reaccionan con los álcalis del cemento, y que traen consigo agrietamientos que desmerecen la apariencia y durabilidad del concreto; sus

^{2,1} Lafarge, grupo industrial de origen francés, N° 1 del mundo en materiales de construcción, cuenta con operaciones comerciales en 77 países. Los negocios en los que participa son: Cemento, Hormigones y Áridos, Cubiertas para Techos y Paneles de Yeso.

partículas, de menor tamaño que las de cemento gris, le otorgan una mejor capacidad de hidratación y propiedades específicas como menor tiempo de fraguado y una elevada resistencia a la compresión.

El cemento Blanco es un producto que difiere notablemente del cemento gris, en los aspectos relacionados con sus costos de elaboración (mucho mas altos que los del cemento gris tradicional), y el mercado al cual esta dirigido. Así las cosas, por su precio, características, y usos los cementos blanco no resultan sustitutos de los cementos grises.

2.2.- Composición

2.2.1.- Materias Primas

— Caliza

La caliza es el principal constituyente del cemento blanco (75 – 85%), es un tipo común de roca blanca sedimentaria, de gran pureza química (98%), compuesta principalmente por calcita (CaCO_3) (90%) y dolomita ($\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)$). Cuando se calcina, da lugar a la cal (óxido de calcio, CaO). Otros componentes presentes en su composición son el óxido de hierro, fósiles y otros minerales. Estos componentes son necesarios para la formación del clínquer en las etapas posteriores. La caliza es aglomerante, neutralizante, escorificante y fundente. Sus principales derivados son la cal, el carbonato de calcio y el cemento.

— Caolín

Caolín (del chino, kaoling, 'cresta alta'), o arcilla china, es un tipo de arcilla muy pura (presenta un bajo contenido de hierro), blanda y blanca, con

plasticidad variable, pero en general baja, que retiene su color blanco durante la cocción. Constituye el segundo componente en importancia en el crudo de cemento blanco (10 – 25 %) y aporta a éste la sílice necesaria. Su principal constituyente es el mineral caolinita, un silicato de aluminio hidratado, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, formado por la descomposición de otros silicatos de aluminio, en especial feldespato, esta descomposición se debe a los efectos prolongados de la erosión. En la actualidad se extrae sobre todo en Malasia y en Cornualles (Inglaterra).

— Yeso

El yeso es un mineral común, consistente en sulfato de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Es un tipo ampliamente distribuido de roca sedimentaria, formado por la precipitación de sulfato de calcio en el agua del mar y está asociado con frecuencia a otras formas de depósitos salinos, como la halita y la anhidrita, así como a piedra caliza y a esquisto. El yeso se origina en zonas volcánicas por la acción de ácido sulfúrico sobre minerales con contenido en calcio; también se encuentra en muchas arcillas como un producto de la reacción de la caliza con ácido sulfúrico.

El yeso utilizado en la fabricación del cemento blanco necesita ser muy puro, con valores que oscilen entre un (80 y 90%) de grado de pureza. La principal función que cumple con su adición al crudo es regular la hidratación y el fraguado del cemento, mediante una reacción con el aluminato tricálcico. Al formar el sulfoaluminato tricálcico, la mezcla se va hidratando poco a poco y además acelera la hidratación del silicato tricálcico.

2.2.2.- Componentes Químicos

Los compuestos que formarán la composición química del clínquer de cemento blanco proceden de la materia prima utilizada para formar el "crudo",

fundamentalmente calizas y arcillas (caolín), que aportarán una serie de óxidos de cal, sílice, aluminio y otros. Como consecuencia de las altas temperaturas que se generan en el horno, entre estos óxidos se producirán una serie de reacciones que darán lugar a la formación de compuestos complejos que tendrán una estructura más o menos cristalina o amorfa, dependiendo de la velocidad de enfriamiento del clínquer resultante. La composición química del clínquer del cemento blanco depende, pues, no sólo de las materias primas empleadas en su fabricación, sino también de su dosificación (proporción en que intervengan cada uno de los óxidos que aporta la materia prima) y de los procesos de cocción y de enfriamiento. Se debe realizar el análisis químico de la materia prima y obtener los porcentajes en masa de los óxidos y otros compuestos que contienen, para poder dosificar adecuadamente el crudo. En la composición química del clínquer de cemento blanco intervienen muchas sustancias; la mayor parte de ellas contienen tres o más elementos combinados, por lo que las fórmulas a que dan lugar son bastante extensas. Por ello, para estudiar y analizar su composición se realizan las siguientes simplificaciones: por una parte, como la mayoría de estos elementos combinan con el oxígeno, se consideran los compuestos formados por óxidos, lo cual describe correctamente su composición química, aunque no contempla su composición estructural; sin embargo es el medio más común para representar una composición. Por otra parte, designando estos compuestos, no por su composición química, sino por su símbolo.

A continuación en la tabla 2-1.- se indica la composición química media de la materia prima necesaria para obtener un clínquer de cemento blanco y de cemento gris.

Tabla 2-1.- Composición Química del Clínquer Blanco y Gris de Cemento de Portland.

Tipo de cemento	Componentes químicos principales (%)							Componentes mineralógicos principales (%)				
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	P.F	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Blanco	66	22,5	4,5	0,4	2,8	1,0	1,7	0,17	60	19	11	1
Gris	64	20,5	5,4	2,6	3	2,1	1,4	1,4	54	18	10	8

Fuente: Concrete Technology Today, Portland cement Association, April 1999.

2.2.2.1.- Componentes Químicos Principales del Clínquer

Los óxidos principales; óxido cálcico (CaO), anhídrido silícico (SiO₂) y óxido aluminico (Al₂O), constituyen prácticamente más del 90% en peso del clínquer de cemento y dan lugar a la formación de los componentes mineralógicos principales del clínquer. De los óxidos principales, sólo la cal es de carácter básico y los otros son de carácter ácido. De ellos, la sílice y la cal son los componentes activos y la alúmina actúa como fundente.

2.2.2.2.- Componentes Mineralógicos Principales del Clínquer

De los componentes mineralógicos principales; los silicatos tales como el silicato tricálcico (C₃S), silicato bicálcico (C₂S) y el aluminato tricálcico (C₃A), suman del 60 al 80 % en su totalidad y son los responsables de las resistencias mecánicas del cemento.

— **Silicato tricálcico (C₃S) o alita:** considerado como uno de los componentes más decisivos del clínquer, su participación determina la rapidez de fraguado y las resistencias mecánicas. Su cantidad en el clínquer está entre el 35 y el 70%.

— **Silicato bicálcico (C₂S) o belita:** su presencia da lugar a pocas resistencias en los primeros días, pero luego las va desarrollando progresivamente hasta alcanzar al silicato tricálcico.

— **Aluminato tricálcico (C_3A)**: por sí solo contribuye poco a las resistencias pero, en presencia de los silicatos desarrolla unas resistencias iniciales buenas, aunque no está clara su forma de participar en la resistencia y endurecimiento del cemento, creyéndose que actúa como catalizador de la reacción de los silicatos. Su fraguado es rapidísimo al tomar contacto con el agua, desprendiendo una gran cantidad de calor: 207 cal/g. Para retardar su gran actividad se emplea el yeso que actúa como retardador, regulador y normalizador del fraguado.

2.2.3.- Componentes Secundarios

Los componentes secundarios proceden de las impurezas de la materia prima. El término "secundario" no se refiere a su importancia e influencia, sino a la pequeña cantidad en que aparecen en la composición del clínquer. Normalmente no se tienen en cuenta, tanto por su cuantía como por su acción (aunque son la parte indeseable del cemento), siempre que no se sobrepasen los valores medios indicados; sin embargo, no por ello dejan de tener una gran importancia por los efectos negativos a que pueden dar lugar.

2.3.- Fabricación

El proceso de fabricación del cemento blanco es absolutamente similar al del cemento gris normal en lo que a etapas del proceso se refiere, la diferencia radica en los elevados costos operacionales y tecnológicos bajo los cuales este se lleva a cabo, controlando estrictamente todas las etapas, para evitar la posible contaminación y cambios indeseados.

Básicamente éste se define como un proceso químico que consiste en la transformación de las materias primas minerales (piedra caliza y arcilla caolín) constituyentes de la harina cruda en un nuevo producto: el clínquer formado por

minerales sintéticos diferentes: fases de silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que le darán las propiedades hidráulicas al cemento. En el caso del cemento blanco, las fases de ferritos son muy bajas, ya que para obtener el color blanco las materias primas deben estar exentas de hierro o contener cantidades insignificantes de este. Este proceso químico de clinquerización tiene lugar en el horno y tiene un paso previo de trituración y molienda de las primeras materias, y un proceso posterior de molienda del clinquer con yeso para obtener el producto final que es el cemento blanco.

En ocasiones, a esta mezcla de materias primas principales se le añaden otros productos, llamados correctores, que ayudarán a ajustar la composición química del crudo, a fin de regular la temperatura de sinterización de la mezcla y la cristalización de los minerales del clinquer.

Datos indican que para obtener una tonelada de cemento blanco se utilizan aproximadamente 1,5 toneladas de materia prima. La relación aproximada entre los materiales calizos y arcilloso en el crudo del clinquer blanco es de 3 a 1 (es decir, se toma alrededor del 75% de caliza y el 25% de arcilla tipo caolín para confeccionar el crudo).

2.3.1.- Proceso de Elaboración – Preparación Mecánica

2.3.1.1.- Obtención del Crudo Blanco

— Selección y Preparación de Materias Primas

- **Consideraciones**

La selección y preparación de las materias primas que intervienen en la fabricación del cemento blanco es mucho más estricta en comparación al cemento gris. Estas deben ser de naturaleza muy pura además de contener cantidades insignificantes de óxidos de hierro, manganeso y cromo (8 a 10 veces

menos que para el cemento gris), esta es la principal forma de asegurar que el producto acabado sea de color blanco. La piedra caliza debe contener menos de 0,15% de FeO_3 ^{2,2} y menos de 0,015% de MnO ^{2,3}; la arcilla (caolín) debe contener 65-80% de SiO_2 ^{2,4}, no más que 1,0% FeO_3 , menos de 0,8% de TiO_2 ^{2,5} y solamente rastros de MnO .

Generalmente, el caolín conveniente contiene el 70 - 73% de SiO_2 , 18-20% del AlO_3 ^{2,6}, 0,4-1% de FeO_3 , y 0 -0,8% de TiO_2 y la arena debe contener no menos que el 96% de SiO_2 , y no más que 0,2% de FeO_3 .

Debe tomarse en consideración el hecho de que incluso los minerales puros (tales como C_3S y C_2S)^{2,7}, sinterizados bajo condiciones de control exacto en el laboratorio, pueden tener un color que sea diferente al blanco.

La composición de mezcla cruda del cemento blanco incluye (en peso) el 20% de SiO_2 , hasta el 5% del AlO_3 y el 75 - 85% de CaCO_3 . Generalmente, la composición de la mezcla cruda se diseña para proporcionar un coeficiente de saturación de 0,85 - 0,88 y módulo del silicato de 3,2 - 4,0.

El uso del yeso como componente de la escoria también es eficaz dando por resultado un consumo de energía más bajo y un aumento en la resistencia. Cuando está utilizado en la composición de la escoria, no sólo proporciona la sinterización en temperaturas más bajas, sino también cambia perceptiblemente las características ópticas del cemento final.

— Proceso de Trituración

La trituración consiste en llevar las materias primas al estado pulverulento. La trituración de la caliza y el caolín se hace por un molidor de bolas de acero. El de la arena se hace por molidor de bolas.

^{2,2} FeO_3 , Óxido ferroso.

^{2,3} MnO , Óxido de magnesio.

^{2,4} SiO_2 , Dióxido de silíce.

^{2,5} TiO_2 , Dióxido de titanio.

^{2,6} AlO_3 , Trióxido de aluminio.

^{2,7} C_3S y C_2S , Silicatos tricálcico y bicálcico, respectivamente.

La caliza es triturada mediante dos operaciones. Una trituración primaria que permite reducir la granulometría de 1000 mm. A la entrada hasta 100 mm. A la salida. Seguidamente y luego de verificar su composición química, pasa a la trituración secundaria, con la que se reduce la granulometría de los materiales hasta los 30 mm.

El caolín sufre una única trituración que reduce el tamaño de las partículas a 30 mm. Lo machacado se somete a continuación a una operación de separación en la cual la denegación se reciclará y la harina cruda pasa hacia el silo de almacenamiento y homogeneización.

— **Molino de Crudo**

En esta etapa se dosifican las características químicas de la harina que se desea obtener. El sistema consta de básculas dosificadoras, cada una de ellas capaz de gobernar las proporciones de caliza y caolín que son incorporadas al molino de bolas o a las prensas de rodillos, hasta lograr que la mezcla adquiera la finura necesaria, convirtiéndose en un producto pulverulento homogéneo llamado harina cruda, al cual se le controla su granulometría y su composición química, esto último de forma automática, mediante un sofisticado sistema interactivo de análisis químico por Rayos X.

— **Homogeneización**

El material molido debe ser homogeneizado para garantizar la efectividad del proceso de clínquerización mediante una calidad constante. Este procedimiento se efectúa en silos de homogeneización por medio de una corriente de aire comprimido. Un sistema de muestreo y análisis por fluorescencia X permite controlar la composición geoquímica. Para una cocción no perturbada y una buena calidad de clínquer, es necesario que los constituyentes machacados sutilmente estén distribuidos igualmente y que cada micro volumen presente la

misma composición geoquímica que el del conjunto de la harina cruda para asegurar una cocción no perturbada y una buena calidad del clínquer.

2.3.1.2.- Obtención del Clínquer

— Horneado

La harina cruda es introducida mediante sistema de transporte neumático y debidamente dosificada a un intercambiador de calor por suspensión de gases de varias etapas, en la base del cual se instala un moderno sistema de precalcinación de la mezcla antes de la entrada al horno rotatorio donde se desarrollan las restantes reacciones físicas y químicas que dan lugar a la formación del clínquer. El intercambio de calor se produce mediante transferencias térmicas por contacto íntimo entre la materia y los gases calientes que se obtienen del horno, a temperaturas de 950 a 1100°C en un sistema de 4 a 6 ciclones en cascada, que se encuentran al interior de una torre de concreto armado de varios pisos, con alturas superiores a los cien metros.

— Cocción

La cocción reviste una importancia particular en la fabricación del cemento por cuatro razones:

1. Es durante la cocción que se efectúa la transformación de la harina cruda en clínquer;
2. Es la cocción que determina, en gran parte, la calidad del producto terminado;
3. La cocción participa en razón de 30 al 60% al costo de producción del cemento;

4. La cocción determina de una manera preponderante el consumo de energía.

Fases de la Cocción

- **Secado del Crudo:** hasta los 200°C.
- **Calentamiento:** desde los 200 hasta los 700°C. Se queman las impurezas orgánicas, se elimina el agua combinada del caolín y otros compuestos semejantes y se elimina el CO₂ del CO₃Mg.
- **Calcinación:** desde los 700 hasta los 1100°C. Se completa el proceso de disociación de los carbonatos de calcio y de magnesio y aparece una cantidad considerable de óxido de calcio libre. Se produce así mismo la descomposición de los minerales arcillosos deshidratados en los óxidos SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, que reaccionan con el CaO. Como resultado de estas reacciones, que transcurren en estado sólido, se forman los minerales C₃A, AC y en parte C₂S.
- **Reacciones Exotérmicas:** desde los 1100 hasta los 1250°C. Hasta aquí todas las reacciones han sido endotérmicas (absorbiendo calor del entorno). En esta fase se producen las reacciones de fase sólida en que se forman C₃A, FAC₄ y SC₂. Estas reacciones son exotérmicas (liberando calor hacia el entorno), lo que provoca un intenso aumento de la temperatura en un tramo relativamente corto del horno.
- **Sinterización:** 1300 -1450 -1300°C. La temperatura alcanza el máximo valor (1450°C) necesario para la fusión parcial del crudo y la formación del principal componente mineralógico del clínquer, el SC₃ (silicato tricálcico también conocido como ALITA).
- **Enfriamiento:** desde los 1300 hasta los 1000°C. En esta fase se forma por completo la estructura y composición definitiva del clínquer, en la cual figuran SC₃, SC₂, AC₃, FAC₄, la fase vítrea y los componentes secundarios.

— Enfriamiento del Clínquer

El clínquer sale del horno rotatorio en forma de granos pétreos, menudos, de color verde (característico del cemento blanco) a una temperatura de 1100 a 1200 °C, este calor se reduce en un recinto llamado enfriador. La descarga del horno se produce en forma continua, experimentando un enfriamiento (de 1000 a 100°C) que debe ser rápido, utilizándose para ello sistemas como enfriadores de tambor, enfriadores satélite, etc. Que mediante corrientes de agua absorben la energía calorífica de la pared del refrigerador por conducción

Si el clínquer formado en el proceso de sinterización se enfría lentamente, puede invertirse el sentido de las reacciones.

El clínquer consta esencialmente de cuatro (4) principales minerales señalados en la tabla 2.2.-

Tabla 2-2.- Minerales principales del clínquer de cemento Portland

Mineral	Fórmula (1)	Abreviación (2)	Nombre	Función
Silicato Tricálcico	$3CaOSiO_2$	C3S	Alita	Resistencias iniciales
Silicato Bicálcico	$2CaOSiO_2$	C2S	Belita	Resistencias a largo plazo
Aluminato Tricálcico	$3CaOAl_2O_3$	C3A	Celita (3)	Rápida formación de cemento
Aluminoferrato Tretacálcico	$4CaOAlO_3Fe_2O_3$	C4AF (4)	Felita, Ferrita	Sin efectos sobre la resistencia del cemento

Fuente: elaboración propia

(1) Forma pura.

(2) Forma combinada definida en Alemania por el Sueco TERNEBOHM en 1897.

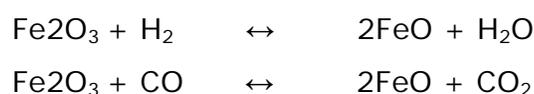
(3) designada a menudo como C3A + C4AF

(4) El contenido en C4AF debería tender a cero en un clínquer de cemento blanco. Este ferrito y el aluminato, se denominan "Fundentes", y son los que

funden a temperaturas más bajas, por lo que al casi no aparecer en la composición del cemento blanco hace necesario elevar la temperatura de cocción (fusión), para formar el clínquer blanco. Se suelen añadir otros compuestos que actúen como fundentes, que son guardados celosamente por las cementeras.

— Decoloración del Clínquer

El clínquer es introducido en un decolorador, en este proceso el Fe_2O_3 se transforma en FeO , es decir, lleva los iones Fe del estado de oxidación (+ III) de color rojo en estado (+ II) de color verde. Esta reacción se desarrolla en un medio reductor rico en CH_4 según la ecuación:



Para conservar el hierro a su estado (+ II), el clínquer se empapa en agua a partir de su salida del decolorador. Su temperatura es aproximadamente de 250 a 300 °C.

2.3.1.3.- Transformación del Clínquer en Cemento Blanco

— Molienda del Clínquer

El clínquer es una piedra sintética con formas esféricas de tamaño variable, que por molienda se transforma en el producto final: cemento portland. La molturación del clínquer blanco se realiza conjuntamente con la adición de un pequeño porcentaje de yeso, para regular la fragua del cemento. La selección de un tipo apropiado de yeso con pureza elevada es muy importante en esta etapa. Sin esta adición, el cemento produciría un fraguado instantáneo con

la mezcla de agua, por lo que impediría su trabajabilidad en las etapas iniciales de la preparación de morteros y hormigones.

— Adiciones finales

El resultado de la molienda del clínquer con el yeso es el polvo de cemento; en este caso se trataría de un cemento sin adición. En los cementos con adiciones, se agrega durante la molienda caliza blanca, en proporciones controladas y normalizadas.

2.4.- Control del Color – Blancura y Graduación del Cemento Blanco

El color es un parámetro muy importante dentro del control de calidad en la industria del cemento blanco, la cual mantiene estándares terminantes para resolver necesidades de cliente. El color del cemento blanco depende de los materiales y del proceso de fabricación. Los óxidos de metal tales como hierro, manganeso, y otros influyen la blancura y el tono del material.

La blancura de los cementos blancos es una de sus características más importantes. La graduación siguiente se utiliza para especificar cementos por lo que se refiere a la blancura:

- **Grado 1:** con la blancura no menos que 80%
- **Grado 2:** con la blancura de 75-80%
- **Grado 3:** con la blancura de 68-75%.

La constante investigación sobre la estructura química y física de los clínquer blancos industriales, han hecho posible obtener un excelente grado de blancura y garantizar su calidad permanente, estudios sobre la influencia de los

componentes menores -los llamados tintes- y, en particular, el tratamiento de calor recibido por el clínquer. El clínquer blanco se produce tomando la precaución de limitar a no más del 0.15% el contenido de compuestos ferrosos y otros compuestos metálicos pesados, cuyas presencias dan al cemento portland común su color gris distintivo. Para lograr esto, se empieza por seleccionar cuidadosamente las materias primas: únicamente se usan caolines y piedras calizas blancas mineralógicamente puras.

Se utilizan pruebas de control cromático tomando como referencia la forma de colorimetría de luz reflejada, usando materiales altamente reflectantes tales como el óxido de magnesio o el titanio. Los resultados de estas pruebas se ilustran en una cromografía, de acuerdo con el sistema ICI (International Commission on Illumination).

En pocas palabras, la calidad "blanca" del cemento se mide usando tres parámetros:

- **Pureza:** es decir, la intensidad del tono. La pureza se mide en porcentaje de color.
- **Longitud de onda dominante:** es decir, la tonalidad que acompaña y caracteriza cada superficie blanca (por esta razón, no todos los cuerpos blancos son iguales). La longitud de la onda dominante se encuentra entre el amarillo y el azul.
- **Brillantez:** es decir, el poder para reflejar la luz incidente (la característica más importante de los cuerpos blancos), expresada como la diferencia en porcentaje entre la luz reflejada por una superficie blanca y aquella reflejada por una superficie similar de óxido de magnesio, tradicionalmente considerado el cuerpo blanco ideal.

En cualquier caso, en lo que respecta a los cementos, la

característica colorimétrica puede representarse únicamente mediante los parámetros de brillantez y pureza.

El parámetro longitud de onda básica, que normalmente se requiere para los diferentes polvos en los cementos, permanece básicamente igual (para cementos ordinarios, $\lambda = 577 \pm 2$ nm; para cementos blancos, $\lambda = 567 \pm 2$ nm).

2.5.- Usos y Aplicaciones

El enorme potencial estético y decorativo del cemento blanco, le conceden un amplio rango de aplicaciones, similares a las del cemento gris, pero de mayor belleza y de acabado fino.

Sus usos van desde proyectos de construcción en estructuras residenciales, comerciales e industriales, hasta enormes obras públicas.

Tradicionalmente el uso que se le ha dado a este material ha sido para repello de fachadas, paredes externas y como fragua o pegamento para cerámica o terrazo, sin embargo su utilización es ideal para la construcción arquitectónica donde se requiera un color más ligero o más brillante por razones estéticas o de seguridad.

Con él se pueden obtener una amplia gama de colores y tonalidades, con sólo agregarle, durante la preparación, algún pigmento de color. Por otro lado, si se mantiene su blanco natural, confiere a las obras gran funcionalidad, ya que con el acabado blanco, provee a la edificación una mayor reflectividad, generando un ahorro en requerimientos de luminosidad y creando ambientes interiores más frescos.

Es de vital importancia recalcar que el cemento blanco no es sustituto del cemento gris, debido a que su elevado costo, generado por la exhaustividad de su proceso productivo, lo convierte en un material que está dirigido hacia un cierto grupo de consumidores, que buscan con su utilización innovación y apariencias estéticas de acabados finos y duraderos en el tiempo.

— Hormigón Arquitectónico, Hormigón Blanco, Hormigón Coloreado

El hormigón arquitectónico es un término aplicado a una vasta variedad de tratamientos de superficie para el hormigón expuesto a la vista cuyo uso representa un elemento diferenciador en las obras, garantizando elegancia y belleza, luminosidad y estética, y resistencia a las abrasiones, sin restar funcionalidad, valores incuestionables en arquitectura.

El hormigón arquitectónico es la superficie exterior o interior del mismo, ya sea este especial o convencional, que a través de la aplicación de un acabado, forma, color, o textura contribuye a la apariencia arquitectónica y acabado final de la estructura.

El hormigón arquitectónico está permanentemente expuesto, por lo que requiere de un especial cuidado en la selección de los materiales y encofrados que se emplean en su elaboración, así como en el colado y el acabado final.

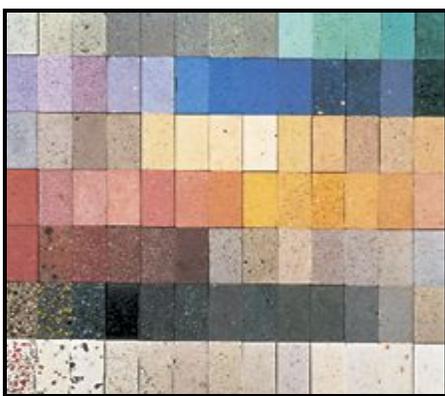


Imagen 2-1.- Hormigón Pigmentado

Fuente: [www. tauton.com](http://www.tauton.com)

— Hormigón reforzado con Fibra de Vidrio

El propósito de la fibra de vidrio en los paneles de hormigón blanco es similar al del acero en el hormigón gris convencional y consiste en reforzar el hormigón. La incorporación de fibra de vidrio es posible en el cemento blanco, debido a su bajo contenido de álcalis, puesto que este (altamente presente en el cemento gris) reacciona con el vidrio provocando fisuras y agrietamiento en el hormigón. El vidrio es más liviano que el acero, por lo tanto reduce ostensiblemente el peso de los paneles arquitectónicos, proporcionando una amplia gama de tamaños y formas altamente resistentes y livianos.



Imagen 2-2.- Vista Panel Arquitectónico reforzado con Fibra de Vidrio.

Fuente: www.hctrading.com

— Morteros

El cemento blanco es la materia prima primordial para la fabricación de morteros de diversos tipos: estucos, monocapas, lechadas y pegamentos. El mortero de cemento blanco permite una fácil preparación y uso, otorgando una gran durabilidad y representando una alternativa de bajo costo para el consumidor. Puede ser mezclado en el sitio de trabajo, proporcionando ventajas de flexibilidad y utilización.

— Lechada de Azulejos

La mampostería es el complemento de belleza y resistencia de azulejos, pisos y paredes, asegurándolos en lugar mientras que los protege contra el daño del agua. La lechada de azulejo hecha con cemento blanco le agrega distinción al acabado y muchas posibilidades de colores y diseños.

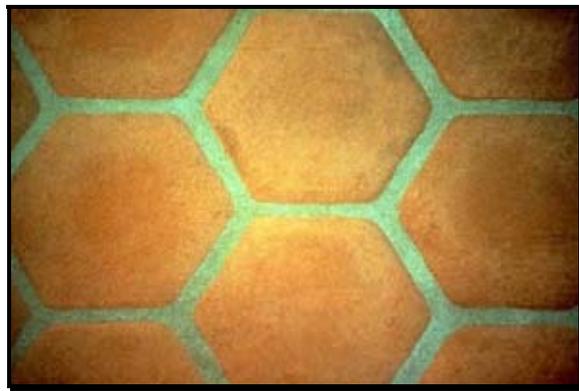


Imagen 2-3.- Lechada pigmentada en base a cemento blanco.

Fuente: [www. hctrading.com](http://www.hctrading.com)

— Pavimentos – Terazzo

Un piso de terrazo se compone de trozos de piedra o mármol incrustados en cemento. Su superficie pulida hace de él un material muy duradero para sus pisos.

La superficie visible del azulejo consiste en agregados de mármol enlazados con cemento blanco. Este proceso ofrece una variedad infinita de patrones superficiales dependiendo del tipo de mármol, de su calidad y de la opción de pigmentos.



Imagen 2-4.- Azulejos enlazados con cemento blanco

Fuente: [www. hctrading.com](http://www.hctrading.com)

— Pavimentos – Adoquines y Losas de Hormigón Blanco

Los adoquines y las losas de cemento blanco son una alternativa económica, fácil de instalar y mantener, ideal para ambientes urbanos.

Con una fuerza de compresión excepcionalmente alta, los adoquines se utilizan generalmente donde el tráfico ejerce cargas pesadas. Por ejemplo, paseos peatonales, estacionamientos, etc.

Las losas del hormigón son útiles para áreas del tráfico ligero: por ejemplo, calzadas peatonales, terrazas, etc. El cemento blanco se utiliza para hacer la superficie atractiva y para mantener permanente la marcación de los caminos garantizando una mayor visibilidad bajo cualquier circunstancia.



Imagen 2-5.- Adoquines de cemento blanco.

Fuente: [www. hctrading.com](http://www.hctrading.com)

— Otros Usos

La variedad casi ilimitada de composiciones basadas en agregados naturales como arena y pigmentos al cemento blanco, permite crear objetos contemporáneos que están en armonía con los criterios más exigentes del diseño.

El cemento blanco resuelve estos desafíos mientras que estimula la creatividad, permitiendo sus usos para estatuas y ornamentos decorativos, estructuras prefabricadas, construcción de piscinas, restauración de edificios históricos, etc.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA – PROCESO DE CARACTERIZACIÓN

En este capítulo se describen los procedimientos utilizados para llevar a cabo la caracterización de los distintos cementos en estudio, detallando algunas de las consideraciones experimentales.

3.1.- Generalidades

La experiencia busca determinar, mediante la realización de ensayos normalizados y regidos por la norma chilena NCh 148.Of68, las principales propiedades del cemento blanco en estado fresco (cemento en estado pasta) y en estado endurecido (mortero de cemento). De igual manera se realizarán las mismas mediciones a dos variedades de cementos grises de grados corriente y alta resistencia, a fin de poder distinguir las diferencias en el comportamiento de los aglomerantes blancos y grises.

3.2.- Metodología de Trabajo

- El análisis se realizó a 5 marcas de cemento comercial obtenidos en distintos comercios de la ciudad de Valdivia; de éstos tres corresponden a cemento blanco y dos a cemento gris, (cemento gris de alta resistencia y cemento gris corriente).
- Físicamente, la totalidad de los ensayos correspondientes a determinar las propiedades de los cementos en estudio, fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Ensaye de Materiales de Construcción (LEMCO) perteneciente a la Universidad Austral de Chile.

- Se realizaron la misma serie de ensayos y en el mismo orden, a cada tipo de cemento blanco y gris.
- Las mezclas de los materiales para la realización de la totalidad de los ensayos se realizaron utilizando el método de mezclado manual establecido en la norma NCh 151. Of68.
- Se comienza con la preparación de varias pastas de cemento a las que se adicionan distintas dosis de agua se hasta encontrar aquella que permita a cada pasta de cemento blanco y gris alcanzar la consistencia normal.
- Luego y utilizando cada una de las dosis de agua resultante de la prueba de consistencia normal, se prepararon cinco pastas de cemento de consistencia normal, en las cuales mediante el método de penetración de la aguja de Vicat, se midió los tiempos inicial y final de fraguado.
- La trabajabilidad fue evaluada, según el método de asentamiento del cono (cono reducido), en las mezclas de mortero normal en estado fresco.
- Finalmente el comportamiento mecánico de cada uno de los cementos en cuestión, fue determinado mediante la confección y posterior ensayo a flexión y compresión a las edades de 3, 7, 14, 21 y 28 días, en 75 probetas cúbicas (moldes Rilem) de mortero normal de tamaños 4x4x16 cm³.

3.3.- Materiales Utilizados

3.3.1.- Cementos

— Cemento Blanco Tolteca[®].

El cemento blanco Tolteca[®], es fabricado en México por la empresa CEMEX, Empresa Cementera Mexicana. Se distribuye en sacos de 45 kg. Y a granel.

— **Cemento Blanco Huascarán®**.

El cemento blanco Huascarán®, es producido en el Perú por la Compañía Minera Agregados Calcáreos S.A. Se distribuye en sacos de 45 kg. Y a granel.

— **Cemento Blanco Puma®**.

El cemento blanco Puma® es de origen chino, se distribuye en bolsas de 1 kg.

— **Cemento gris grado Corriente – Bio-Bio®**.

Es un Cemento clase siderúrgico, grado corriente, fabricado en Chile, se distribuye en sacos de papel de 42,5 kg.

— **Cemento gris grado Alta Resistencia – Melón®**.

Es un cemento Portland Puzolánico grado alta resistencia, fabricado en Chile por la empresa cementera Melón, se distribuye en sacos de papel de 42,5 Kg.

3.3.2.- Áridos

— **Arena normal**

La arena utilizada para la realización de las pruebas es arena normalizada^{3,1}, elaborada por el Instituto de Investigación y ensayos de Materiales, IDIEM, perteneciente a la Universidad de Chile. Su composición granulométrica se encuentra indicada en la NCh 158.Of67.

^{3,1} *Arena Normal: arena natural, cuarzosa, de granos redondeados, procedente de la zona de Las Cruces, Cartagena. La arena estará dividida en tres fracciones, fina, media y gruesa.*

3.3.3.- Agua

Para la preparación de todas las mezclas se utilizó agua potable, la cual puede usarse sin verificar su calidad según NCh 1498.

3.4.- Acondicionamiento

Indistintamente para todos los ensayos realizados a los cementos, se debieron cumplir y controlar las siguientes condiciones:

- Antes de comenzar con cualquier ensayo, se pesó, separó y colocó en bolsas herméticas, porciones de 500 gr. de cada tipo de cemento, evitando así que este se expusiera a la intemperie, protegiéndolo de la humedad hasta el momento de su ensayo.
- El equipo para la ejecución de las pruebas debió estar en condiciones de operación, calibrado, limpio y completo en todas sus partes.
- La cámara húmeda debió permanecer con una humedad relativa superior o igual al 90%, y una temperatura constante de $23^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$.
- La temperatura de los materiales y aparatos usados debió estar entre los 18°C y 27°C .
- La temperatura de la sala se mantuvo entre los 18°C y 27°C .
- La temperatura del agua de consistencia normal varió del orden de los $23^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$.
- La humedad relativa de la sala debió mantenerse por sobre el 50%.

3.5.- Ensayos

3.5.1.- Determinación de la Consistencia normal de la Pasta de Cemento

— Objetivo de la Prueba

Este ensayo nos permite conocer cual es la cantidad de agua apropiada que se debe agregar al cemento para obtener una pasta de una determinada consistencia, denominada pasta de consistencia normal. Esta cantidad de agua demandada por el cemento para obtener la consistencia normal, además es necesaria para la determinación de los tiempos de fraguado inicial y final. El método para su determinación se basa en la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración de la sonda de Tetmayer de un aparato normalizado, llamado Aparato de Vicat.

— Procedimiento

El procedimiento para determinar la consistencia normal de la pasta de cemento se realizó según método establecido por la norma chilena NCh 151.Of68, "Cemento – Método de determinación de la consistencia normal". Se confeccionaron pastas con distintas proporciones de agua hasta obtener la consistencia normal de la pasta de cemento.

— Preparación de la pasta de cemento

- Se vertió sobre 500 gr. de cemento una determinada cantidad de agua.
- Se volcó el cemento desde las orillas hacia el centro por un periodo de 30 segundos.
- Luego se mezcló vigorosamente la pasta por un período de 5 minutos contados desde el momento de agregar el agua.



Imagen 3-1.- Preparación Pasta Normal de Cemento Blanco (1)

Fuente: *elaboración propia (2005)*



Imagen 3-2.- Preparación Pasta Normal de Cemento Blanco (2)

Fuente: *elaboración propia (2005)*

— Ensayo

- Inmediatamente después de terminado el mezclado, se vertió la pasta de cemento en el molde, sin efectuar presión, y se enrazó con la ayuda de una espátula.
- Se colocó el molde con la pasta sobre la placa de vidrio y se centró debajo del vástago del aparato de vicat.
- Se llevó el indicador a coincidir con marca superior 0 y se soltó la sonda.
- La pasta tubo consistencia normal cuando la sonda se detuvo a 6 ± 1 mm. Sobre el fondo del molde, 30 segundos después de haberla soltado.



Imagen 3-3.- Vaciado Pasta Normal de Cemento Blanco al Molde Tronco - cónico

Fuente: *elaboración propia (2005)*



Imagen 3-4.- Enrasado

Fuente: *elaboración propia (2005)*



Imagen 3-5.- Aparato de Vicat y Sonda Tetmayer

Fuente: *elaboración propia (2005).*

3.5.2.- Determinación de los Tiempos de Fraguado Inicial y Final de la pasta de cemento

— Objetivo de la prueba

Utilizando la cantidad de agua necesaria para el cemento en cuestión, resultante de la prueba de consistencia normal, este ensayo nos permite medir el tiempo en que la mezcla cemento-agua pierde plasticidad y comienza a adquirir cierto grado de rigidez. El método se basa en la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración de la aguja del Aparato de Vicat. Este ensayo, constituye una determinación de resistencia al corte, apropiado para determinar la viscosidad de la pasta de cemento, mediante una designación arbitraria del tiempo de fraguado.

— Procedimiento

Los procedimientos de prueba para determinar, por el método de Vicat, los tiempos de fraguado inicial y final de las pastas de cemento, se realizaron según lo especificado en la norma NCh 152.Of71, "Cemento – Método de determinación del tiempo de fraguado".

Se Preparó la pasta de cemento de consistencia normal, utilizando la cantidad de agua resultante del ensayo de consistencia normal y se mezcló con 500 gr. de cemento siguiendo el mismo procedimiento de preparación de la pasta de cemento normal descrito en 3.5.1, luego se vertió sobre el molde y se enrazó.

— Ensayo

- Se colocó el molde con la pasta debajo de la aguja del aparato de vicat.
- Se llevó el indicador a coincidir con marca superior 0 y se soltó la sonda.

- Se registraron mediciones sucesivas a distancias iguales o superiores a 10 mm. Del borde interior del molde y a 5 mm. Entre ellas; limpiando completamente la aguja después de cada medición.
- El cemento alcanzó el principio de fraguado cuando la aguja se detuvo a 4 ± 1 mm sobre el fondo del molde 30 segundos después de haber soltado el dispositivo móvil.
- La determinación del tiempo de fraguado final se hizo con la probeta invertida. La inversión se realizó cuando la pasta estuvo lo suficientemente rígida.
- El cemento alcanzó el final de fraguado cuando sólo la aguja dejó una impresión y no marcó el borde circular del accesorio.



Imagen 3-6.- Aparato de Vicat y Aguja de Vicat

Fuente: *elaboración propia (2005)*

3.5.3.- Determinación de la Trabajabilidad del mortero de cemento – Método asentamiento del cono (cono reducido)

— Objetivo de la prueba

Este ensayo realizado con mortero normal de cemento en estado fresco, tiene como finalidad determinar la trabajabilidad del cemento.

La trabajabilidad del cemento es determinada por el grado de fluidez que presenta el mortero, y se expresa como la diferencia de altura o descenso que experimenta la mezcla fresca de mortero normal después de haber levantado el cono, medido con respecto al tamaño de este.

—Procedimiento

El procedimiento para determinar la consistencia de los morteros, se realizó utilizando el método del Asentamiento del Cono (cono reducido), según lo indica la norma NCh 2257/3.Of96, "Morteros – Determinación de la consistencia – parte 3: Método del asentamiento del cono".

— Preparación del mortero normal de Cemento

El mortero normal se preparó mezclando dos partes de cemento (500 gr.), seis partes de arena normal (1500 gr.) y una parte de agua (250 ml.), los materiales fueron mezclados enérgicamente en forma manual hasta que se obtuvo el mezclado homogéneo de las partes.



Imagen 3-7.- Preparación de Mortero Normal (método mezclado manual)

Fuente: *elaboración propia (2005)*

— Ensayo

- El mortero se vertió en el cono, en dos capas de aproximadamente igual volumen y se compactó con 20 golpes de varilla pisón, en cada una de las llenadas.
- Luego se enrasó y se levantó el cono lenta y cuidadosamente dirección vertical.
- Una vez levantado el molde, se midió la disminución de altura que experimento el mortero moldeado respecto de la altura del molde.
- La Docilidad será la diferencia entre la altura de la mezcla antes y después de haber levantado el molde.



Imagen 3- 8.- Medición del Asentamiento del Cono
Fuente: *elaboración propia (2005)*

3.5.4.- Determinación de las Resistencias Mecánicas – Resistencia a la Flexión y a la Compresión del mortero de cemento

— Objetivo de la prueba

Los cementos deben ser capaces de conferir resistencias iguales o superiores a las determinadas por las normas, en probetas preparadas con un mortero cuyos componentes, fabricación, conservación y ensayos están

normalizados (NCh 158 Of67).

— Procedimiento

Los procedimientos para determinar la resistencia a la flexión y a la compresión de morteros de cemento, se realizaron según lo especificado en la norma NCh 158.Of67, "Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento".

- Las mezclas de cemento, arena y agua (mortero normal), se dosificaron siguiendo el procedimiento descrito en 3.5.3, empleado según la normativa chilena para la confección de morteros de cemento.
- Las probetas se prepararon en moldes de acero (moldes Rilem) que permitían la confección simultánea de tres de ellas.



Imagen 3-9.- Llenado de moldes Rilem

Fuente: *elaboración propia (2005)*



Imagen 3-10.- Compactación manual

Fuente: *elaboración propia (2005)*



Imagen 3-11.- Enrasado de moldes Rilem

Fuente: *elaboración propia (2005)*

- Una vez fabricadas las probetas, se identificaron y almacenaron en una cámara de curado, a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y 90% de humedad, durante 24 horas.
- Luego se desmoldaron permaneciendo en la cámara de curado, sumergidas en agua, hasta completar los días 3, 7, 14, 21 y 28, correspondientes a las edades del ensayo.



Imagen 3-12.- Molde identificado y conservado en cámara húmeda

Fuente: *elaboración propia (2005)*



Imagen 3-13.- Probetas desmoldadas y sumergidas en agua.

Fuente: *elaboración propia (2005).*

- Los días correspondientes a los ensayos, las probetas se extrajeron de la cámara húmeda e inmediatamente luego de esto fueron pesadas y ensayadas a la flexión en estado húmedo. Cada uno de los dos trozos resultantes del ensayo de flexión, de cada probeta, fue sometido a ensayo de compresión.

— Ensayo de Flexión

- La probeta se apoyó en una de las caras laterales del moldaje, sobre los rodillos de apoyo de la máquina de flexión. La carga se aplicó a través del rodillo superior con una velocidad de carga de 5 ± 1 kg/seg.
- Los trozos de las probetas rotas a flexión, se conservaron húmedos hasta el momento en que cada uno de ellos se sometió al ensayo de compresión.



Imagen 3-14.- Prensa CBR para ensayos de Flexión

Fuente: *Elaboración propia (2005)*

— Ensayo de Compresión

- Cada trozo obtenido del ensayo a flexión se ensayó a la compresión, en una sección de 40 x 40 mm, aplicándose la carga a las dos caras provenientes de las laterales del moldaje, colocándose entre las placas de la máquina de compresión.



Imagen 3-15.- Máquina para ensayo de Compresión

Fuente: *elaboración propia (2005)*



Imagen 3-16.- Ensayo de compresión

Fuente: *elaboración propia (2005)*

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1.- Consistencia Normal de la Pasta de Cemento

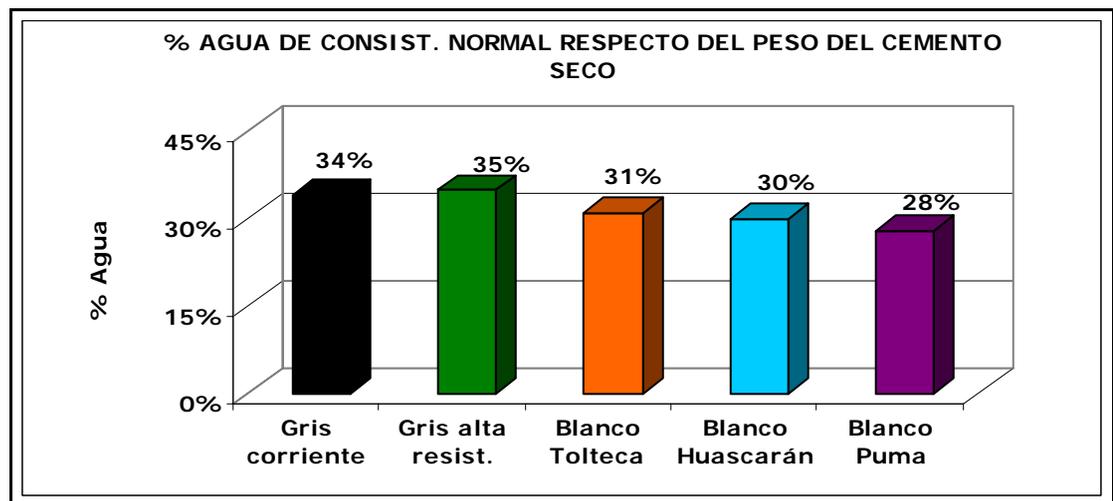
La tabla 4-1 muestra los resultados del ensayo tendiente a determinar la dosis de agua necesaria para alcanzar la consistencia normal de las pastas de cemento.

Tabla 4-1.- Resultados ensayo de Consistencia Normal de las Pastas

Tipo de cemento	Agua de consistencia normal	
	(ml.)	% Agua respecto a peso del cemento
Gris corriente	170	34%
Gris alta resistencia	175	35%
Blanco Tolteca	155	31%
Blanco Huascarán	150	30%
Blanco Puma	140	28%

Fuente: *Elaboración propia*

Gráfico 4-1.- Porcentajes de Agua de Consistencia Normal requerida por los Cementos Blancos en relación a los Cementos Grises.



Fuente: *Elaboración propia*

La cantidad de agua requerida por los cementos para alcanzar la consistencia normal se expresa en porcentaje respecto del peso seco del cemento. En este caso, el peso correspondiente a cada cemento fue de 500 mg.

El gráfico 4-1. Muestra claramente que mientras las mezclas de cemento gris necesitaron cantidades de agua por sobre los 170 ml, es decir, entre un 34% - 35% de agua en relación al peso del cemento gris, los cementos blancos requirieron en promedio cantidades entre los 140 ml y los 155 ml de agua, vale decir, entre un 28% - 31% de de agua en relación al peso del cemento blanco.

4.2.- Tiempos de Fraguado Inicial y Final de la pasta de Cemento

Los tiempos inicial y final de fraguado se muestran en la tabla 4-2.

Tabla 4-2.- Resultados ensayo de Determinación del Inicio y Término de Fraguado de las Pastas de Cemento.

Tipo de cemento	Inicio de fraguado (min.)	Fin de fraguado (min.)
Gris corriente	160	240
Gris alta resistencia	130	210
Blanco Tolteca	110	210
Blanco Huascarán	40	150
Blanco Puma	90	190

Fuente: *Elaboración propia.*

—Desarrollo del proceso de fragüe

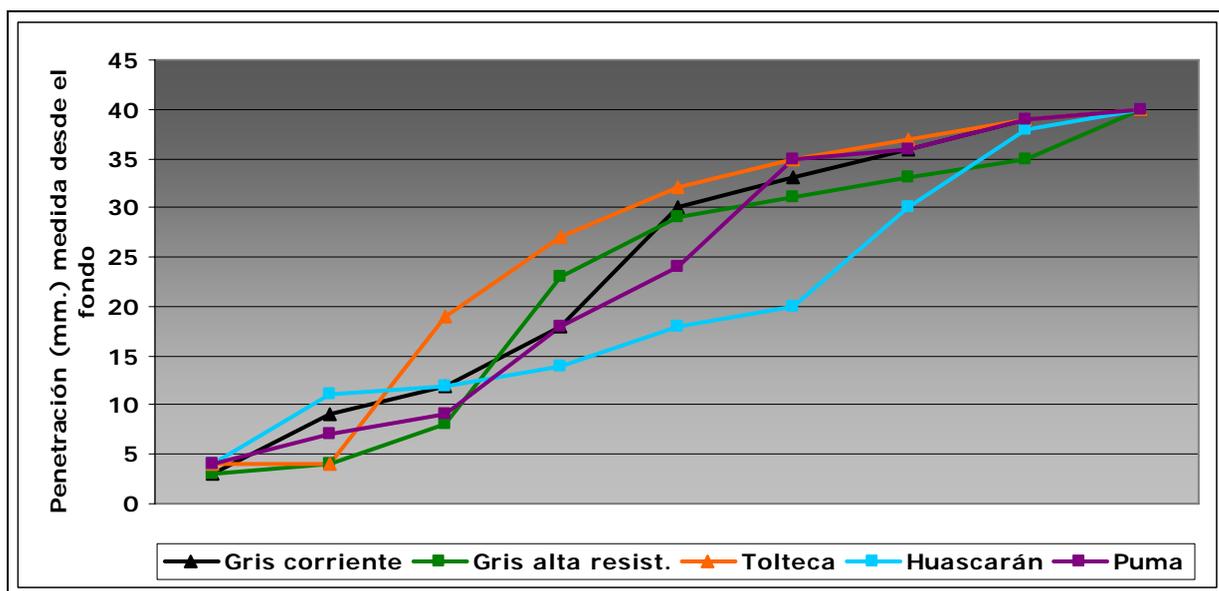
Tabla 4-3.- Evolución del proceso de Fraguado. Penetraciones medidas desde el fondo del molde.

	Gris corriente	Gris alta resist.	Tolteca	Huascarán	Puma
Penetración desde el fondo (mm.)	3	3	4	4	4
	9	4	4	11	7
	12	8	19	12	9
	18	23	27	14	18
	30	29	32	18	24
	33	31	35	20	35
	36	33	37	30	36
	39	35	39	38	39
	40	40	40	40	40

Fuente: *elaboración propia*

- En relación al proceso de fraguado (grafico 4-2), de los cemento blancos Tolteca y Puma, estos se desarrollaron en forma normal y constante; los tiempos que tardaron ambas variedades en comenzar a fraguar fueron 110 min. Y 90 min. Respectivamente, mientras que sus correspondientes términos de fraguado se registraron a los 210 min. Y 190 min. De iniciadas las mezclas. Por su parte el proceso de fragüe del cemento blanco Huascarán se desarrolló en forma anormal. Se caracterizó por comenzar a fraguar en un tiempo excesivamente corto (40 min.), este valor está 5 minutos por debajo del tiempo inicial mínimo requerido por la normativa chilena para cementos de grado corriente y 20 minutos por debajo de las exigencias para cementos de grado alta resistencia. Su término de fraguado lo registró a los 150 minutos de preparada la muestra por lo que se mantuvo dentro de los valores estipulados por la norma. Cabe señalar que el ensayo para determinar los tiempos de fraguado inicial y final del cemento Huascarán fue repetido en reiteradas ocasiones, considerando que posiblemente un error en la realización del ensayo o en los registros del tiempo pudieron afectar los resultados, sin embargo, no se presentaron mayores variaciones de estos.

Gráfico 4-2.- Penetraciones y Desarrollo del proceso de Fraguado de cementos blancos y grises.



Fuente: *Elaboración propia.*

4.3.- Trabajabilidad del Mortero de Cemento – Método del Asentamiento del Cono

Los resultados del ensayo de docilidad, determinada mediante el ensayo de asentamiento del cono, se muestran en la tabla 4-4.

Tabla 4-4.- Resultados ensayo de Trabajabilidad del Mortero de Cemento (Asentamiento del Cono).

Cemento	Promedio Asentamiento del cono (cm.)
Gris corriente	1,7
Gris alta resist.	1,1
Blanco Tolteca	2,1
Blanco Huascarán	1,9
Blanco Puma	2,2

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 4-5.- Variación porcentual entre el Asentamiento del Cono (Trabajabilidad) de los Cementos Blancos respecto de los Cementos Grises.

Tipo de cemento	Promedio Asentamiento cono (cm.)	Variación con respecto a (%.)	
		Cemento gris corriente	Cemento gris alta resistencia
Gris corriente	1,7	—	—
Gris alta resist.	1,1	—	—
Blanco Tolteca	2,1	24%	91%
Blanco Huascarán	1,9	11,8%	72,7%
Blanco Puma	2,2	29,4%	100%

Fuente: *Elaboración propia*

Se presentó gran similitud en el descenso de los tres cementos blancos, las mediciones indicaron 2,1 cm. Para Tolteca, 1,9 cm. Huascarán y 2,2 cm. En el cemento Puma. Así las variedades Tolteca y Puma presentaron un aumento en la trabajabilidad de un 72,7% y 100% (respectivamente) en relación a la presentada por el cemento gris de alta resistencia.

4.4.- Resistencias Mecánicas del Mortero de Cemento

4.4.1.- Resultados ensayo de Resistencias a la Flexión

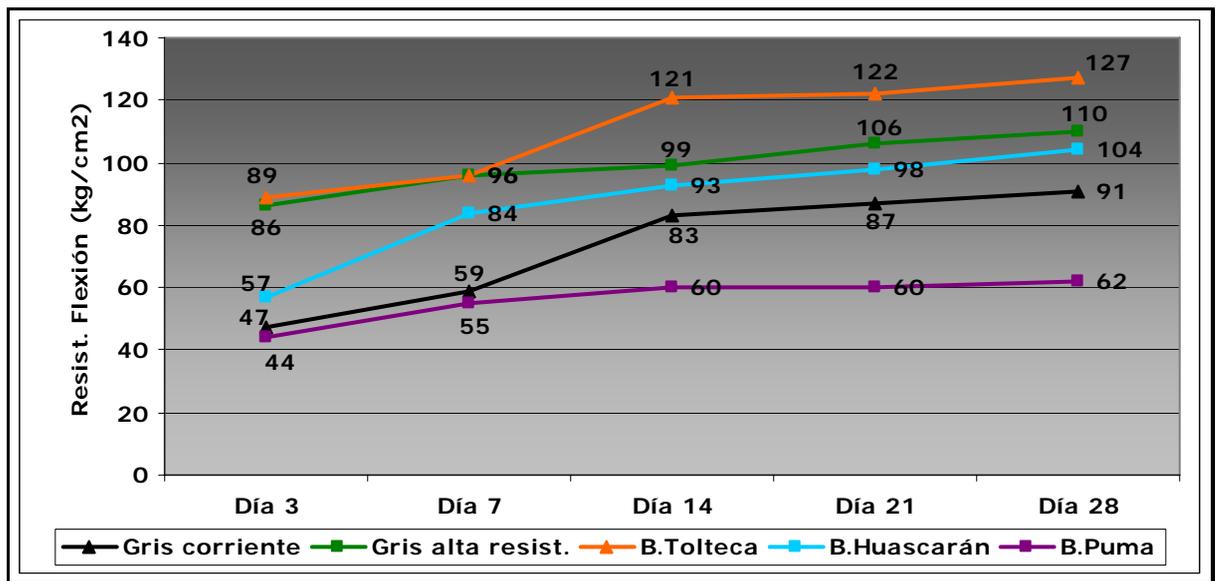
Los resultados de los ensayos realizados a los cementos para determinar sus respectivas resistencias a la flexión, se encuentran detallados en la tabla 4-6.

Tabla 4-6.- Resultados ensayo de Resistencias a la Flexión del mortero de cemento.

Tipo de cemento	Resistencias a la flexión (kg/cm ²)				
	Día 3	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
Gris corriente	47	59	83	87	91
Gris alta resistencia	86	96	99	106	110
Blanco Tolteca	89	96	121	122	127
Blanco Huascarán	57	84	93	98	104
Blanco Puma	44	55	60	60	62

Fuente: *Elaboración propia*

Gráfico 4-3.- Evolución de las resistencias a esfuerzos de Flexión



Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 4-7.- Variación porcentual de la flexión de los cementos blancos c/r al cemento gris corriente.

Cemento blanco	Variación porcentual de la flexión del cemento blanco c/r al cemento gris corriente (%)				
	Día 3	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
Tolteca	89%	62,7%	45,8%	40,2%	39,6%
Huascarán	21,3%	42%	12%	12,6%	14,3%
Puma	(-) 6,4%	(-) 6,8%	(-) 27,7%	(-) 31%	(-) 31,9%

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 4-8.- Variación porcentual de la flexión del cemento blanco c/r al cemento gris alta resistencia.

Cemento blanco	Variación porcentual de la flexión del cemento blanco c/r al cemento gris alta resistencia (%)				
	Día 3	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
Tolteca	3,5%	0%	22,2%	15%	17%
Huascarán	(-) 33,7%	(-) 12,5%	(-) 6,1%	(-)7,5%	(-)5,5%
Puma	(-) 48,8%	(-) 42,8%	(-) 39,4%	(-) 43,4%	(-) 43,6%

Fuente: *Elaboración propia*

Las resistencias a la flexión presentadas por el cemento blanco Tolteca fueron en todas las mediciones superiores a las desarrolladas por los demás aglomerantes blancos y grises.

Al analizar según tablas 4-7 y 4-8 la flexión del cemento Tolteca respecto del cemento gris corriente, las diferencias son bastante amplias, generándose el día 28 una variación del orden del 40 % más de flexión del aglomerante blanco en relación al gris grado corriente.

Las diferencias surgidas con el cemento gris de alta resistencia comienzan a ser evidentes desde el día 14 en adelante, pues durante los días 3 y 7 ambos cementos (Tolteca y gris de alta resistencia) presentaron flexiones casi idénticas. Las diferencias de flexión vistas el día 14 fueron disminuyendo hacia el día 28 en donde finalmente se registró una diferencia del 17% entre la flexión del cemento blanco Tolteca respecto de la desarrollada por el gris de alta resistencia.

El comportamiento del cemento blanco Huascarán, en cuanto al desarrollo de su flexión se registró de forma regular, mostrando el día 7 valores cercanos a los presentados por el cemento gris de alta resistencia, valores que se estrechan mas hacia el día 28, en donde el cemento blanco Huascarán presentó apenas un 5,5% menos de flexión que el aglomerante de alta resistencia. Las diferencias surgidas respecto del cemento gris corriente fueron más amplias,

presentando en todas las mediciones resistencias a la flexión superiores a las del aglomerante gris corriente.

4.4.2.- Resultados ensayo de resistencias a la Compresión

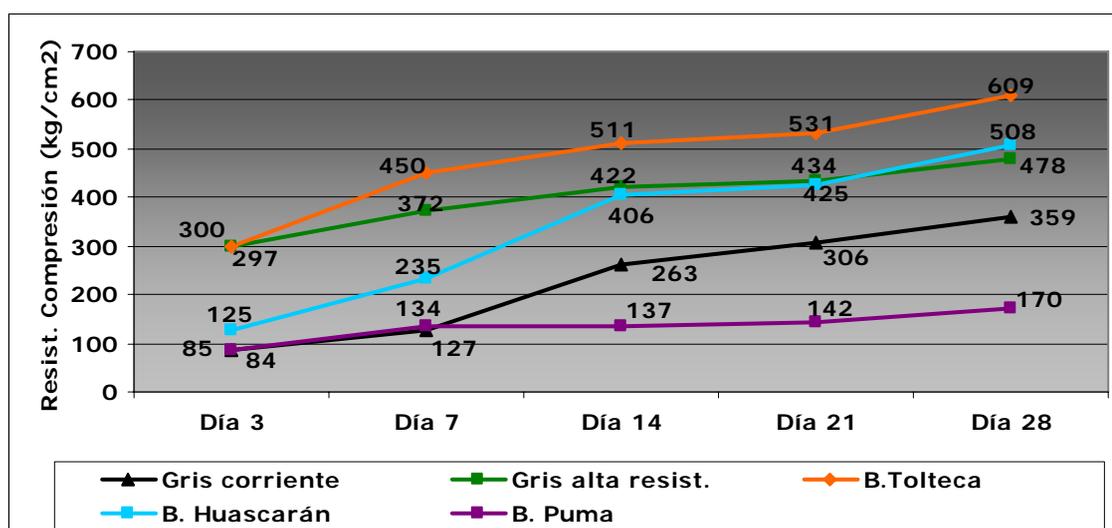
Los resultados del ensayo de compresión realizado a cada uno de los cementos en estudio se han detallado en la tabla 4-9.

Tabla 4-9.- Resultados ensayo de Resistencia a la Compresión del Mortero de Cemento.

Tipo de cemento	Resistencias a la compresión (kg/cm ²)				
	Día 3	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
Gris corriente	84	127	263	306	359
Gris alta resistencia	297	372	422	434	478
Blanco Tolteca	300	450	511	531	609
Blanco Huascarán	125	235	406	425	508
Blanco Puma	85	134	137	142	170

Fuente: *Elaboración propia.*

Gráfico 4- 4.- Evolución de las resistencia a esfuerzos de Compresión



Fuente: *Elaboración propia.*

Tabla 4-10.- Variación porcentual de la resistencias a la Compresión de los cementos blancos c/r al cemento gris corriente.

Cemento blanco	Variación porcentual de la compresión del cemento blanco c/r al cemento gris corriente (%.)				
	Día 3	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
Tolteca	257%	254,30%	94,30%	73,50%	69,30%
Huascarán	48,80%	85%	54,40%	38,90%	41,50%
Puma	1,20%	5,50%	(-) 47,9%	(-) 53,5%	(-) 55,6%

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 4-11.- Variación porcentual de la resistencias a la Compresión de los cementos blancos c/r al cemento gris alta resistencia

Cemento blanco	Variación porcentual de la compresión del cemento blanco c/r al cemento gris alta resistencia (%.)				
	Día 3	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
Tolteca	1%	21%	21%	22,40%	27,40%
Huascarán	(-) 57,9%	(-) 36,8	(-) 3,8%	(-) 2,1%	6,30%
Puma	(-) 71,3%	(-) 64%	(-) 67,5	(-) 67,3%	(-) 64,4%

Fuente: *Elaboración propia.*

El cemento blanco Tolteca presentó un excelente comportamiento en términos de desarrollo de resistencias a la compresión, las mediciones indicaron que desarrolla altas resistencias iniciales, específicamente los días 3 (300 kg/cm²) y 7 (450 kg/cm²), en donde superó al aglomerante gris de grado corriente en un 257% y un 254,3% respectivamente.

Respecto del cemento gris de alta resistencia, las diferencias se presentaron más holgadas, pero siempre superiores para el aglomerante blanco; si bien es cierto sus resistencias a la compresión fueron muy similares (especialmente durante la medición del día 3, en donde el cemento Tolteca marcó 300 kg/cm² y el gris de alta resistencia 297 kg/cm², registrándose una diferencia de apenas un 1%), hacia los días 7, 14 y 21, Tolteca mantiene una superioridad

del orden del 21-22%, finalmente presenta el día 28 un 27,4% más de resistencia a la compresión que el aglomerante de alta resistencia y un 69,3% mas respecto del gris corriente.

Los valores de las resistencias a la compresión del cemento blanco Huascarán se presentan bajos en las primeras mediciones, sin embargo estas aumentan y se estabilizan desde el día 14 en adelante, registrándose en el proceso un comportamiento similar al cemento gris de alta resistencia.

Las resistencias a la compresión desarrolladas por el cemento blanco Puma, son hasta el día 7 similares a las presentadas por el cemento gris corriente y muy por debajo de las presentadas por las otras variedades de cementos blancos y gris de alta resistencia. Llama la atención que este cemento no experimenta un aumento en su resistencia a la compresión entre los días 14 y 21, la cual se mantiene muy baja con un valor de apenas 137 kg/cm². El día 28 este aglomerante registró una compresión de 170 kg/cm² lo que indica un 55, 6% menos de compresión que el cemento gris corriente y un 64,4% menos de compresión que la variedad de alta resistencia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Finalizada la experiencia, y siempre teniendo en cuenta la limitación que supone el escaso número de cementos blancos caracterizados, se han podido obtener las siguientes conclusiones principales:

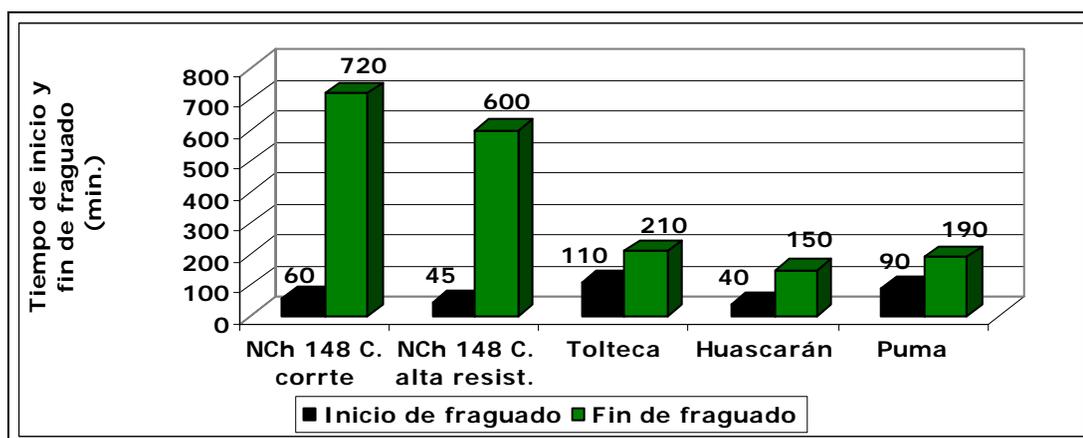
—Con respecto a la Consistencia Normal de las pastas de cemento.

- Se constató que los cementos blancos requieren una menor cantidad de agua para alcanzar la Consistencia normal de las pastas (5% menos aproximadamente), en relación a las dosis solicitadas por los cementos grises corriente y alta resistencia.

—Con respecto a los Tiempos de Fraguado de las pastas de cemento.

- La tendencia indicó que los cementos blancos comienzan a fraguar más tempranamente y que el proceso completo de fragüe, desde la mezcla de las pastas hasta el fin de fraguado, lo desarrollan en un tiempo ostensiblemente menor, en comparación con los cementos grises corriente y alta resistencia.
- Queda en evidencia que el cemento blanco Huascarán no cumple con los requisitos de tiempos mínimos de inicio de fraguado estipulados en la norma NCh 148, comenzando a fraguar 5 minutos por debajo del tiempo inicial mínimo requerido para cementos de grado corriente y 20 minutos por debajo de las exigencias para cementos de grado alta resistencia. Las demás variedades de cementos en estudio cumplen satisfactoriamente las exigencias establecidas en la norma. (gráfico 5-1).

Gráfico 5-1.- Tiempos de Fraguado Inicial y Final de los Cementos Blancos respecto de los mínimos exigidos por la NCh 148.



Fuente: *Elaboración propia.*

—Con respecto a la Trabajabilidad del mortero de cemento.

- Las tres variedades de cemento blanco, experimentaron para una misma cantidad de agua (500 ml), un mayor descenso del cono respecto de los cementos grises, esto indica que las argamasas blancas requieren de una menor cantidad de agua para obtener un mismo asentamiento respecto de los cementos grises corriente y alta resistencia, demostrando con esto que poseen una mayor trabajabilidad.

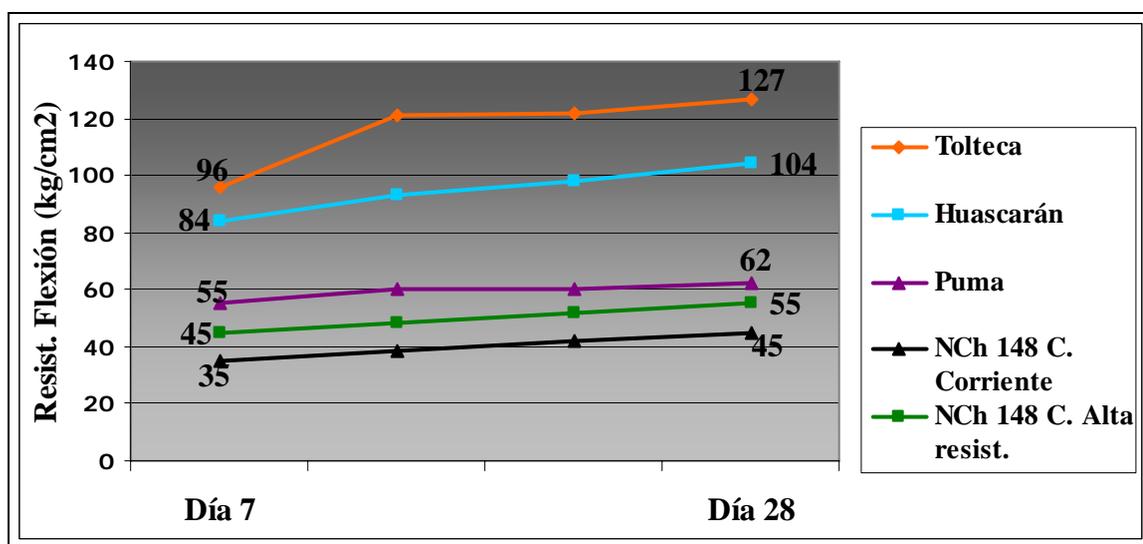
—Con respecto a las Resistencias mecánicas del mortero de cemento.

Resistencia a la Flexión del mortero de cemento:

- La tendencia de los resultados indicó que los cementos blancos en estudio son capaces de desarrollar resistencias a esfuerzos de flexión con valores que cumplen con los mínimos señalados en la norma NCh 148. (Gráfico 5.2.-).

- Específicamente podemos señalar que Tolteca presentó los valores más elevados superando el día 28 en un 39,6% y 17% a los cementos grises corriente y alta resistencia, respectivamente.
- Por su parte Huascarán demostró que su resistencia final a esfuerzos de flexión (día 28) es superior a la del cemento gris corriente, pero inferior a la del cemento gris alta en un 5,5%.
- Puma presentó un escaso aumento de su resistencia a la flexión (18 kg/cm², entre la primera y la última medición); durante la medición del día 28 las resistencias a la flexión presentadas por este aglomerante blanco son un 31,9% y un 43,6% más bajas que las registradas por los cementos grises corriente y alta resistencia, respectivamente.

Gráfico 5-2.- Resistencias a la Flexión de los Cementos Blancos respecto de los mínimos exigidos por la NCh 148.

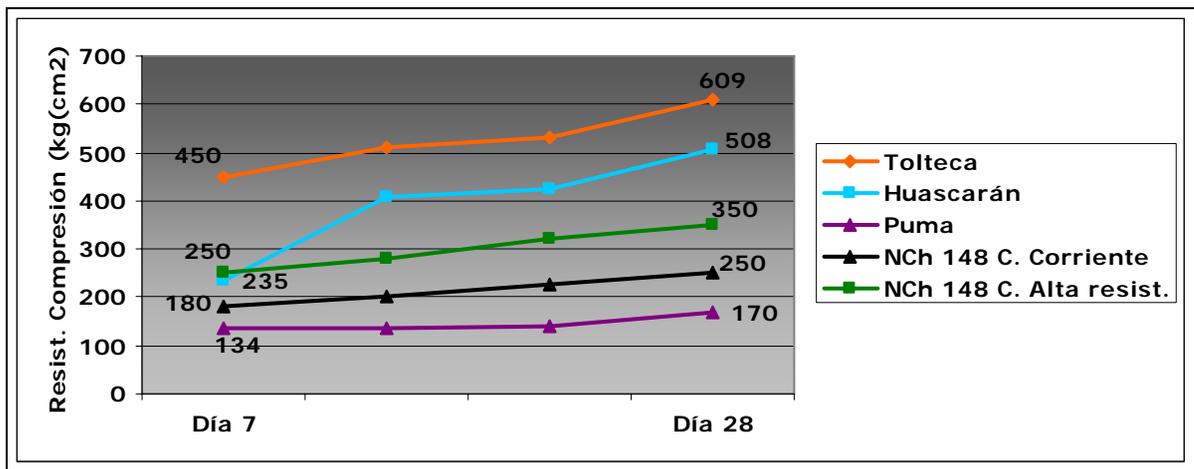


Fuente: *Elaboración propia.*

Resistencia a la Compresión del mortero de cemento:

- Las diferencias significativas en el comportamiento (valores e incrementos de las resistencias) surgidas entre las tres variedades de cementos blancos impiden establecer una tendencia general acerca de los cementos blancos y su desempeño frente a esfuerzos de compresión.
- Cemento blanco Tolteca, demostró ser un aglomerante que desarrolla elevadas resistencias iniciales a esfuerzos de compresión, sus valores durante la medición registrada el día 7, superan en un 254,3% y 21% a los cementos grises corriente y alta resistencia, respectivamente. Su comportamiento en general se asimila al de un cemento de alta resistencia; Sus valores durante la última medición sobrepasan en un 69,3% y 27,4% a los cementos grises corriente y alta resistencia, mientras que el incremento total en su resistencia a la compresión a los 28 días fue de un 103% en comparación con los 60,9% de aumento presentados por el mortero fabricado en base a cemento gris de alta resistencia.
- Por su parte los ensayos permitieron establecer que el aglomerante blanco Huascarán desarrolla bajas resistencias iniciales a esfuerzos de compresión, estos valores aumentan progresivamente hacia el día 28 sobrepasando finalmente en un 6,3% los valores presentados por el cemento gris alta resistencia; el incremento total en su resistencia fue de un 75,4%.
- El cemento blanco Puma presentó durante todas las mediciones resistencias a esfuerzos de compresión con valores muy por debajo a los registrados por el cemento gris grado corriente. Su comportamiento, el cual casi no registró aumento, en ningún caso se asemeja al de un cemento grado corriente; su resistencia final a los 28 días fue de 170 kg/cm², este valor se encuentran por debajo de los mínimos exigidos por la NCh 148.

Gráfico 5-3.- Resistencias a la Compresión de los Cementos Blancos respecto de los mínimos exigidos por la NCh 148.



Fuente: *Elaboración propia.*

—Conclusión Final

- Por último y como conclusión general podemos afirmar que los cementos blancos (a excepción del cemento Puma) cumplen con los requerimientos de especificaciones estándar para cementos de grado corriente y de alta resistencia establecidos en la norma chilena NCh 148; y que sus características de buena trabajabilidad, fraguados ajustables en el tiempo, y el excelente desarrollo de resistencias a la compresión (superiores a las del cemento gris), lo clasifican como un cemento de alta resistencia, apto para uso estructural, dejando en claro además, la igualdad de usos y de condiciones con que puede utilizarse en relación al cemento gris, pero proporcionando una calidad superior en términos estructurales y estéticos.

ANEXO A

Cálculo de las resistencias a la flexión y a la compresión de probetas RILEM

De acuerdo a la Norma chilena NCh 158 Of.1967 Ensayo de flexión y Compresión de mortero cemento, se realizarán los ensayos a las probetas RILEM, obtenidas por cada preparación de mortero correspondiente a cada tipo de cemento.

Los pasos a seguir para hacer y ensayar una probeta rilem fueron descritos en el capítulo III, secciones 3.5.3 "Preparación del mortero normal de cemento" y 3.5.4 "Determinación de las resistencias mecánicas – Resistencias a la flexión y a la compresión del mortero de cemento".

Los ensayos realizados para obtener las resistencias a la compresión correspondiente a los días 3 y 7 y las resistencias a la flexión, se hicieron en la prensa CBR.

Obtenidas las lecturas de los ensayos, se aplican a dichos valores la constante del anillo

$$C = \text{Carga} \times 5,79 + 59,99 \quad (\text{kg}) \quad \text{Ec. (1)}$$

Para luego aplicarla en las fórmulas correspondientes a flexotracción y compresión.

$$\text{Fórmula de Flexión} \quad \sigma_f = C \times 0,234 \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \text{Ec. (2)}$$

$$\text{Fórmula de Compresión} \quad \sigma_c = C / A \quad (\text{kg/cm}^2) \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde; A: es el área de sección de la probeta y que corresponde a 16 cm².

0,234: Constante que depende de la distancia entre los apoyos.

Los ensayos para calcular las resistencias a la compresión correspondientes a los días 14, 21 y 28 se realizaron en la prensa de compresión, donde las mediciones se leen en megapondio (Mp).

1 Megapondio = 1000 kilogramos

Obtenidas las lecturas de la prensa de compresión, las resistencias se obtienen a través del siguiente cálculo:

Fórmula de Compresión $\sigma_c = P / A$ (kg/cm²) **Ec. (4)**

Donde; P: Lectura de la Prensa de compresión

A: Área de contacto igual a 16 cm².

BIBLIOGRAFÍA

- CZERNIN, W. 1963. La Química del Cemento. Ediciones Palestra.
- MALDONADO, BELISARIO. 1968. Manual sobre Tecnología del Cemento, Empresas Industriales "El Melón" S.A.
- INSTITUTO CHILENO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN. ICH, 1989. Manual del Mortero.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCh 148. Of. 1968. Cemento — Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCh 151. Of. 1968. Cemento — Método de Determinación de la Consistencia Normal.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCh 152. Of. 1971. Cemento — Método de Determinación del Tiempo de Fraguado.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCh 158. Of. 1967. Cementos — Ensayo de Flexión y Compresión de Morteros de Cemento.
- INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NCh 2257/3. Of. 1996. Morteros — Determinación de la Consistencia — Parte 3: Método del Asentamiento del Cono.
- INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. Revista Construcción y Tecnología - Enero 2001. Disponible en www.imcyc.com. Consultado el 5 de diciembre de 2005.
- INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Cemento Blanco para Concreto de Alto Desempeño. Disponible en www.imcyc.com, A.C. Revista Construcción y Tecnología - Enero 2001. Consultado el 5 de diciembre de 2005.

- ARCHITECTURAL AND DECORATIVE CONCRETE. About white Portland cement. Disponible http://www.cement.org/basics/concretebasics_history.asp. Consultado el 19 de abril de 2006.
- CEMENT AND CONCRETE BASICS. History & manufacture of Portland cement. Disponible http://www.cement.org/basics/concretebasics_history.asp. Consultado el 19 de abril de 2006.
- CEMENTO BLANCO HUASCARÁN. Cemento Blanco. Disponible en <http://www.agregadoscalcareos.com.pe/presentacion.html>. Consultado el 19 de junio de 2006.
- CEMENTO BLANCO TOLTECA. Cemento Blanco. Disponible en http://www.cerroblanco.com.ar/productos/cemento_tolteca.html Consultado el 8 de junio de 2006.
- CONCRETE TECHNOLOGY. Frequently Asked Questions Q: How is white cement different and why is it used in decorative concrete?. Disponible en http://www.cement.org/tech/faq_white_cement.asp. Consultado el 19 de junio de 2006.
- LAFARGE. INVENCIÓN DEL CEMENTO. Disponible en www.lafarge.com/lafarge_en/htm/invention_cement. Consultado el 6 de enero de 2006.
- SUPLEMENTO INFORMATIVO INMOVILIARIO. Construir en Blanco. Disponible <http://www.nacion.com/suplemento-m/2006/abril/01/nota7.html>. Consultado el 19 de junio de 2006.