



**Universidad
Andrés Bello®**

UNIVERSIDAD ANDRES BELLO

Facultad de Ingeniería

Ingeniería en construcción

REUTILIZACIÓN DE AGUA DE LAVADO DE INTERIOR MIXER EN
REEMPLAZO DE AGUA DE AMASADO EN ELABORACIÓN DE HORMIGÓN
FRESCO

Memoria para optar al Título de Ingeniero Constructor

Autor:

Francesca De Lourdes Aranda Moena

Profesor guía:

Carlos Alarcón Novoa

Santiago de Chile

2017

Tabla de contenidos

	Página
Agradecimientos.....	1
Resumen.....	2
Abstract.....	3
CAPÍTULO I: Introducción	
1. 1 Introducción.....	3
1.2 Objetivos: General y específicos.....	4
1.3 Metodología.....	5
CAPÍTULO II: Marco teórico	
2.1.1 Recurso hídrico en Chile.....	6
2.1.2 Manejo de aguas en la industria del hormigón en Chile.....	8
2.1.3 Manejo de aguas en la industria del hormigón en el mundo.....	9
2.1.4 Nuevos métodos de Reutilización del agua.....	10
2.1.5 Potencial ahorro de agua en la industria del hormigón prefabricado.....	13
2.2 Metodología de investigación.....	15
2.2.1 Fabricación de hormigones de prueba.....	17
2.2.1.1 Caracterización de los elementos y materias primas a utilizar.....	18
2.2.2 Determinación y evaluación de docilidad a hormigones de prueba...	24
2.2.3 Determinación y evaluación de resistencia a hormigones de prueba.....	25
2.3 Detalle de procedimientos y ensayos a hormigones de prueba.....	26

2.3.1 Método del asentamiento de cono de Abrams.....	26
2.3.2 Método de ensayo de compresión a probetas cúbicas.....	27
2.4 Detalle corrección dosificación final hormigones de prueba.....	30
2.4.1 Dosificación final hormigón patrón.....	32
2.4.2 Dosificación final Hormigón 25%.....	33
2.4.3 Dosificación final Hormigón 50%.....	34
2.4.4 Dosificación final Hormigón 100%.....	35
CAPITULO III: Resultados y análisis de datos de los hormigones de prueba	
3.1 Expresión de Resultados.....	37
3.1.1 Asentamiento cono de Abrams.....	37
3.1.2 Características cualitativas.....	38
3.1.3 Resistencia a la compresión.....	40
3.1.4 Demanda de agua incorporada sobre dosificación.....	41
3.2 Análisis de datos.....	42
4. Conclusión y sugerencias.....	45
Bibliografía.....	47
Anexo A: Cálculo de resistencias mecánicas.....	49
Anexo B: Glosario.....	56

AGRADECIMIENTOS

A Elsa Moena y Carolina Aranda por su incondicional apoyo, al profesor Carlos Alarcón por su entrega de conocimientos y ser pilar fundamental de ésta memoria de título, a mis amigos Andrés Ardila, Nicolás Jiménez, Yenifer Roco y a Óscar Labarca por estar siempre presente en mi formación profesional.

RESUMEN

La presente tesis realiza la evaluación y análisis acerca de la reutilización de agua de lavado de interior mixer en reemplazo de agua de amasado en la elaboración de hormigón fresco. Como fundamento de investigación, la necesidad de contar con una estrategia de cuidado del recurso hídrico debido a las proyecciones del escenario nacional para los próximos años en donde destaca que el sector industrial incrementará su demanda y los sectores de la economía nacional competirán por la escasez del recurso hídrico y con el fin de promover el equilibrio económico-ambiental en la industria del hormigón se realizó una investigación en laboratorio bajo normas chilenas con el fin de evaluar beneficios de la reutilización del recurso hídrico en esta área de la industria de la construcción.

A través de las evaluaciones desarrolladas en la investigación del hormigón alterado con agua reutilizada y la cuantificación del impacto en el desempeño del hormigón tanto en su estado fresco como endurecido.

ABSTRACT

The present thesis make out the evaluation and the analysis on the reuse of the water of the washing of the inner truck mixer in the replacement of the water of kneading in the elaboration of the fresh concrete. As a research foundation, the need to have a water resource care due to the projections of the national scenario for the coming years, where the industrial sector is highlighted, increase its demand and the sectors of the national economy will compete for the scarcity of the water resource and for to promote the economic-environmental balance in the concrete industry, was carried out a investigation on laboratory under Chilean norms in order to evaluate the benefits of the reuse of the water resource in this area of the construction industry.

Through the evaluations developed in the investigation of the altered concrete with the reused water and the quantification of the impact on the performance of the concrete both in its fresh and hardened state.

CAPÍTULO I: Introducción

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad las medidas de mitigación de impacto ambiental son de gran importancia para las industrias en general, esto conlleva a investigar y a elaborar técnicas que permitan la optimización de procesos y materias primas.

La industria del hormigón no queda impune ante problemas ambientales que emergen en la fabricación de hormigones premezclados. Un recurso esencial para el desempeño del hormigón es el agua, este recurso utilizado como agua de amasado cumple roles importantes dentro de la fabricación del hormigón, permitiendo básicamente hidratar al cemento, formar una pasta que pueda fraguar y endurecer como también dar trabajabilidad a la mezcla. Pero existen requisitos de calidad que esta agua de amasado debe cumplir según la norma NCh1498:2012, en resumen esta norma especifica requisitos a sólidos en suspensión, sólidos disueltos, valores de pH, materia orgánica, cloruros y sulfatos solubles presentes en el agua de amasado, estos requisitos son una gran limitante cuando se desea evaluar la posibilidad de reutilización del recurso hídrico en la industria del hormigón prefabricado.

Este recurso de gran relevancia, es un recurso escaso que utilizado en el lavado interior de un camión mixer al final de la jornada de fabricación de hormigón, significa una pérdida importante de agua, de alrededor 300 litros por camión. Es por ello que investigar el manejo y potencial reutilización de esta agua de desecho permitirá a las empresas de la industria del hormigón premezclado tener un método que permita el reciclado o reutilización del agua de lavado sin tener un impacto en resistencias solicitadas ni en el desempeño del hormigón fresco debido a su empleo, con el fin de eliminar o reducir las actuales limitantes respecto al uso de recurso hídrico reciclado en la industria del hormigón prefabricado.

1.2 OBJETIVOS

- **Objetivos generales:**

- I. Cuantificar el impacto que se produce con la reutilización del agua de lavado interior del camión mixer respecto a las resistencias mecánicas de hormigones.

- **Objetivos específicos:**

- I. Presentar un proceso para reutilización de agua de lavado del interior del camión mixer.
- II. Evaluar el desempeño del hormigón en estado fresco con agua reutilizada directamente del lavado interior del camión mixer.
- III. Cuantificar la reducción de empleo de agua a través de la reutilización del recurso hídrico en la industria del hormigón premezclado.

1.3 METODOLOGÍA

Esta investigación busca comprobar que al utilizar agua reciclada en la fabricación de hormigón fresco este no se verá desfavorecido o no existirán variaciones considerables respecto a resistencias mecánicas, docilidad y aspecto en estado fresco y endurecido.

Para esto se llevará a cabo una metodología de investigación a base de comparación de probetas de hormigón, las cuales se someterán a ensayos de resistencia mecánica, docilidad, aspecto y comportamiento de cono bajo normas chilenas.

Estas evaluaciones y ensayos permitirán conocer si es factible la utilización de agua reciclada generada de la industria del hormigón prefabricado de manera de promover el equilibrio económico-ambiental en la industria de la construcción.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1.1 RECURSO HÍDRICO EN CHILE

Chile ha sido un país precursor de un sistema de libre mercado para la administración del recurso hídrico. Esto ha conllevado a otorgar al sector privado los derechos de este recurso generando su uso centrado en pocos actores provocando el uso ineficiente del recurso hídrico. Esta situación ha afectado la disponibilidad de agua para las economías locales y la conservación de los ecosistemas.

En Chile una importante fuente de contaminación son las industrias. En la renovación del Catastro Nacional de Residuos Industriales Líquidos ejecutada por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS, 1997), demostró que de todas la industrias encuestadas el 58% no cuenta con plantas de tratamiento.

La carente fiscalización junto con un marco regulatorio débil y la priorización de criterios económicos en la gestión del recurso hídrico, ha significado para Chile problemas de abastecimiento y cobertura de este recurso. En la ciudad de Santiago la contaminación de aguas causada principalmente de residuos industriales y aguas servidas alcanza niveles por encima de la capacidad que tiene el medio para regenerarse frente a la descarga de los elementos nocivos, dañando de esta manera los ecosistemas y poniendo en peligro la salud humana. No obstante existe una creciente conciencia nacional sobre el cuidado del recurso hídrico, esta tendencia promueve la reutilización del recurso junto el aumento en implementación de mecanismos de tratamiento de agua para la recuperación de este recurso.

Según estimaciones realizadas por el ministerio de obras públicas para el año 2017, la estructura de la demanda de agua proyecta que el sector agrícola demande el 76,9% del total, la industria con 12,2%; la minería con 6,2% y el agua para uso y consumo humano con 4,7%. (“Política Nacional de recursos hídricos”, 1999)

Además destaca que el sector minero e industrial incrementará su demanda para el 2017. De continuar esta proyección y tendencia nacional, los sectores de la economía nacional competirán con aquellas regiones con baja disponibilidad del recurso natural especialmente desde la primera región a la región metropolitana.

De no tomarse medidas esta situación se agravará para el año 2025, dado que se espera una creciente demanda por el recurso hídrico en regiones que en casos superará el 50%. Es por ello que el sector industrial tiene el gran desafío de minimizar la contaminación del agua, optimizar y perfeccionar su uso en los respectivos procesos productivos industriales.

2.1.2 MANEJO DE AGUAS EN LA INDUSTRIA DEL HORMIGÓN EN CHILE

El crecimiento sostenido de la industria de la construcción a nivel mundial entrega un escenario propicio para poner en práctica en la industria del hormigón sistemas de tratamiento de agua residuales y de lavado.

En Chile el escenario respecto al manejo de aguas residuales en la industria del hormigón está muy por debajo de los sistemas de reciclaje de agua utilizados en el mundo. En la actualidad nacional la reutilización de agua en la industria del hormigón prefabricado apunta básicamente a la reutilización del agua bajo torre de ajuste.

Este sistema de reutilización de agua bajo torre de ajuste se inicia cuando el camión mixer entra a cargar hormigón a la planta y avanza hacia la torre de ajuste, posicionándose bajo mangueras en donde el operador mixer comienza a ajustar la docilidad que el hormigón requiera, en ese instante se aprovecha de lavar por fuera el camión además de eliminar los residuos que quedan en canoa. Esta agua residual es la llamada agua bajo torre de ajuste, la cual es canalizada hacia piscinas de decantación. Este proceso de decantación es a base de piscinas escalonadas que permiten eliminar sólidos en suspensión por gravedad, este material fino llamado “borra” es finalmente llevado a botadero, mientras que el agua reciclada vuelve a ser parte del ciclo de hormigón premezclado.

2.1.3 MANEJO DE AGUAS EN LA INDUSTRIA DEL HORMIGÓN EN EL MUNDO

Actualmente en el mundo existen sistemas que permiten retirar los finos del agua gris de tal manera que es posible obtener agua clarificada. Por ejemplo los sistemas empleados por la empresa Bibko de los cuales se destacan:

- Sistema de filtroprensa: Proceso de clarificación del agua residual y de lavado con finos aglutinantes como el cemento mediante filtración. El proceso se realiza a base de una prensa que está compuesta por platos filtrantes consecutivos, los cuales son cubiertos por una tela filtrante que impide el paso de las partículas más grandes. Durante el proceso los platos son prensados bajo gran presión permitiendo el paso del agua residual entre ellos, posibilitando la filtración de las partículas más finas. Este proceso genera una especie de torta de finos en el mismo filtro, la cual es eliminada cuando las cámaras se llenan. Posteriormente el agua clarificada es reunida y es desviada a una cisterna. El agua clarificada puede utilizarse nuevamente en la producción de hormigón, mientras que la torta puede ser reutilizada como material de relleno o dejarla en tiradero.
- Sistema torre de clarificación: Proceso de clarificación del agua residual y de lavado mediante el uso de una torre de clarificación que está compuesta por dos tubos concéntricos los cuales separan partículas sedimentosas de los líquidos. En la primera fase del sistema el agua residual es descargada en un tubo interno luego las partículas finas contenidas en el agua sedimentan y se reúnen en un embudo inferior, posteriormente el agua ya clarificada es desviada por un canal hasta una cisterna de recolección para volver a utilizarla en el proceso de producción de hormigón. Finalmente un agitador evita que las partículas

sedimentadas se apelmacen en el embudo, desde ahí el lodo de cemento vuelve al proceso de producción o se desecha.

Las ventajas de aplicar estos sistemas son diversos, entre ellas destacan el bajo costo de operación, mantenimiento e instalación; permiten la clarificación de agua con colorantes; reduce los costos de agua por reutilización del agua residual tratada; se reducen los costos por despacho a tiradero o canalización del agua gris y una necesidad de superficie mínima con una capacidad de clarificación importante.

Estas ventajas obtenidas por sistemas de manejo de agua residual, permiten admitir que este escenario a favor del reciclaje del recurso hídrico en el mundo es el nuevo horizonte al cual Chile debe apuntar en un futuro próximo.

2.1.4 NUEVOS MÉTODOS DE REUTILIZACIÓN DEL AGUA

Un problema que afecta al mundo entero es la escasez de agua, es por ello que la reutilización del recurso hídrico resulta un tema fundamental en la industria de la construcción. En la fabricación de hormigones este recurso resulta esencial por lo que es muy importante contribuir con la conservación de este recurso a través de la reducción de su consumo y la creación de nuevos métodos de reutilización del agua.

Como ya hemos visto en los sistemas de manejo de agua, una forma eficiente de reducir el consumo de agua es a través de la reutilización de este recurso ya que pérdida importante del recurso hídrico se produce en la etapa final del proceso del hormigón premezclado. En esta etapa el camión mixer regresa a la planta y su interior, que contiene hormigón residual, es lavado para poder comenzar un nuevo ciclo sin complicaciones que pudieran alterar la calidad del hormigón nuevo a fabricar. Esta acción de limpieza es una rutina diaria que se realiza al equipo como método de mantenimiento, si al interior del tambor mixer no se le realizara un lavado a base de agua los restos de hormigón fraguado y suciedad provocarían conflictos en los helicoidales y en los rodillos del equipo y a su vez esta falta de mantenimiento implicará una baja en la capacidad de recoger el material, como también se corre el riesgo de falta de homogenización de las mezclas. Es por ello que esta etapa de lavado interior del camión mixer es importante para el buen funcionamiento del proceso de producción de hormigón premezclado por tanto no es posible eliminarla del ciclo mixer con el fin de disminuir la demanda de agua y aportar a la conservación del recurso hídrico.

Por ello cada vez es más propio de las hormigoneras que posterior al proceso de lavado de interior del camión mixer se realice un proceso de reciclado a través de la separación de las materias primas contenidas en esta agua residual para atender así al uso eficiente de los recursos y contribuir al cuidado del medio ambiente.

Es por ello que para lograr ir más allá, es de gran importancia investigar nuevas metodologías de reutilización del agua que permita tanto un beneficio para el medio ambiente como para la industria del hormigón premezclado. La reutilización del agua de lavado en reemplazo del agua de amasado en la fabricación de hormigón fresco es una gran alternativa que dará paso al ahorro del agua, a la disminución en la inversión económica que conlleva el proceso de fabricación como también reducir el ciclo mixer respecto del tiempo.

Para reemplazar el agua de amasado por el agua de lavado interior de un camión mixer se deben realizar una serie de ensayos para cuantificar el impacto que el agua reutilizada pueda provocar en el hormigón, tanto en su estado endurecido mediante la medición de resistencias mecánicas, como también a su desempeño como hormigón en fresco, a través de pruebas de mantención de cono y de aspecto que este experimente. Así como también se debe cumplir con la norma NCh1498:2012, esta norma especifica requisitos respecto a valores de pH, sólidos disueltos como en suspensión, materia orgánica, cloruros y sulfatos solubles presentes en el agua de amasado. Esto implica una pérdida importante del recurso hídrico dados los factores exigidos para la fabricación de hormigones. Por ello se propone la investigación de la reutilización directa del agua de lavado interior del tambor mixer en la fabricación de hormigones frescos con el fin de asegurar la calidad del producto y realizar una gestión eficiente y sustentable del agua asegurando la preservación y conservación del recurso hídrico en Chile.

2.1.4 POTENCIAL REDUCCIÓN DE USO DE AGUA EN LA INDUSTRIA DEL HORMIGÓN

En la industria del hormigón prefabricado se utilizan grandes cantidades de agua, es así como la demanda solo de agua de amasado en el mundo es de aproximadamente 1 trillón de litros cada año.

En Chile la Cámara Chilena de la Construcción convoca a empresas a lograr un adecuado equilibrio en la gestión de su negocio entre lo económico, lo social y lo ambiental, permitiéndoles ganar el Premio Empresa Sostenible promoviendo de esta manera el apoyo a la sostenibilidad de los recursos en la industria de la construcción.

Cifras dadas a conocer por el Instituto del Cemento y del Hormigón y la Cámara chilena de la construcción arrojaron que entre los años 2011 y 2014 se despacharon más de 6.000.000 M3 de hormigón prefabricado anualmente.

Estos datos permiten estimar que altas cantidades de agua se usan como agua de lavado en la industria del hormigón prefabricado. Es por ello que considerando los 6.73 M3 de despacho promedio por camión a nivel nacional junto con los 3.1 despachos que realiza un camión al día según el instituto del cemento y el hormigón, se obtiene que el potencial ahorro de agua promedio entre los años 2011 y 2014 fue de 98.080 M3 agua/año. (Ver gráfico N°1)

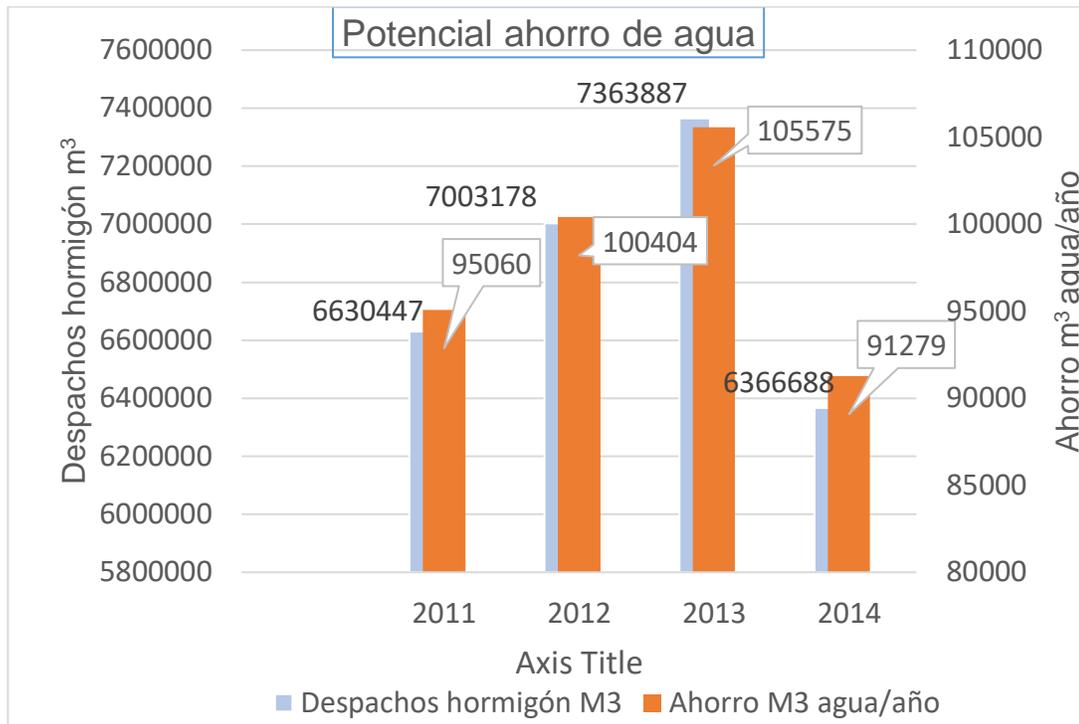


Gráfico n°1, Potencial ahorro de agua en la industria del hormigón prefabricado. Fuente: elaboración propia a partir de cifras dadas a conocer por Instituto del Cemento y del Hormigón y la Cámara chilena de la construcción.

Estas cifras se traducirían en un equilibrio económico-ambiental en la gestión empresarial del hormigón prefabricado si se reutilizara esta importante cantidad de agua reciclada. Esta reutilización repercutiría de manera positiva en el ahorro tanto del recurso hídrico como en el ahorro de recursos económicos. Como reflejo de ello y considerando la tarifa promedio nacional que indica la superintendencia de servicios sanitarios que alcanza los \$825 el M3 de agua, se obtiene que el potencial ahorro de dinero entre los años 2011 y 2014 podría haber sido de \$80.916.000 a lo largo de todo el país por año..

Este potencial ahorro de agua en la industria del hormigón prefabricado justifica los beneficios de la reutilización del agua y la elaboración de nuevos métodos de reciclaje dentro de la industria del hormigón premezclado.

2.2.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para la investigación respecto a la reutilización de agua de lavado de interior mixer en reemplazo de agua de amasado en la elaboración de hormigón fresco, se elaborará hormigón tipo H30(90)20-10 para realizar evaluaciones mediante comparaciones a probetas de hormigones de prueba. Para ello se realizará en un laboratorio acondicionado ensayos bajo normas chilenas a probetas de hormigón de prueba que cumplan con los requisitos de estas normas versus probetas con hormigón de prueba fabricado con agua reciclada del lavado interior de camión mixer en distintos porcentajes en reemplazo de agua limpia. En primera instancia se someterá la amasada a control de docilidad según la norma NCh1019 cada 30 minutos para evaluar comportamiento de cono. Posteriormente bajo la Norma NCh1037 se realizarán ensayos de resistencia mecánica con el fin de analizar diversos parámetros mediante la información cuantitativa y cualitativa obtenida, permitiendo así evaluar el impacto real que provocaría el uso de agua reutilizada del lavado interior del camión mixer en la fabricación de hormigón tanto en estado fresco como endurecido con el fin de reducir o eliminar las limitaciones actuales sobre el uso del agua recuperada de procesos de la industria del hormigón en la fabricación del mismo.

2.2.2 FABRICACIÓN DE HORMIGONES DE PRUEBA

Se fabricarán hormigones de prueba a base de las recomendaciones de la NCh170, esta norma establece los requisitos generales mínimos para fabricar hormigones y morteros. Se elaborará un “hormigón patrón” del tipo H30(90)20-10 debido a que es el hormigón más despachado según Instituto del Cemento y del Hormigón (ICH), para ello la dosificación que se aplicará será tal que cumpla con la resistencia especificada; la razón agua/cemento se determinará por resistencia media a la que se desea llegar mediante procedimiento que la norma NCh170 indica. A su vez se fabricarán 3 hormigones de prueba que variarán respecto al hormigón patrón en la dosificación del agua de amasado que para efecto de esta investigación serán realizados cada uno con 100%, 50% y con 25% de agua proveniente del lavado interior del camión mixer.

Dosificaciones base a utilizar se detalla a continuación:

Hormigón De prueba	Cemento AR [Kg]	Gravilla [Kg]	Arena [Kg]	Agua Potable [L]	Agua Reciclada [L]
Patrón H30(90)20-10	306	830	1265	210	-
H100%	306	830	1265	-	210
H50%	306	830	1265	105	105
H25%	306	830	1265	157,7	52,5

Tabla n°1, Dosificación base para 1m³ de hormigón. Fuente: Elaboración propia a partir de dosificación Ready Mix.

El número total de probetas fabricadas será de 12; 4 probetas de cada hormigón de prueba para ensayarlas a los 14 días, y finalmente 8 probetas (2 de cada tipo de hormigón de prueba) para ensayarlas a los 28 días.

2.2.2.1 CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS Y MATERIAS PRIMAS A UTILIZAR

- I. **Probetas:** Para la fabricación de las probetas de hormigón se utilizarán moldes cúbicos, de 20 cms de arista, metálicos. Bajo la norma NCh1017 Hormigón- Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción.
- II. **Cemento:** Se empleará cemento grado corriente
- III. **Agua:** Se empleará agua potable que cumple con la norma NCh 1498:2012, y agua reciclada proveniente del lavado interior de camión mixer.
- IV. **Áridos**

Para la caracterización de los áridos se realizaron ensayos bajo procedimientos detallados a continuación:

- **Granulometría** bajo la noma NCh 165 – Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría.

El procedimiento consiste en reducir por cuarteo el árido a utilizar para conseguir y determinar la masa de la muestra de árido en estado húmedo, luego la muestra húmeda es secada mediante una estufa 110°C. La operación continúa vaciando la masa de muestra seca fría en el juego de tamices y registrando la masa retenida, porcentaje retenido parcial y acumulado en cada tamiz. Para finalmente expresar la granulometría como el porcentaje acumulado que pasa.

Granulometría áridos

Tamiz N°	Gravilla % que Pasa	Arena % Pasa
1 1/2"		
1"	100	
3/4"	95	
3/8"	6	100
4		92
8		65
16		49
30		33
50		13
100		4
200		1
Módulo finura	6,99	2,6

Tabla n°2, Granulometría áridos. Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos en laboratorio.

- **Densidad real y neta, y la absorción de los áridos**

Gravas: bajo la norma NCh 1117:2010 que establece los procedimientos para determinar las densidades real y neta y la absorción de las gravas.

El procedimiento consiste en determinar la masa de una muestra pesándola al aire, en estado seco y en estado saturado superficialmente seco. Luego se determina su volumen por diferencia entre las pesadas al aire y sumergida en agua. Conocidas la masa y su volumen se calcula las densidades real y neta y la absorción de las aguas, en función de los valores obtenidos para las diferentes condiciones de pesadas.

Densidades grava:

Densidad real del árido saturado superficialmente seco	2,72 Kg/m ³
Densidad real del árido seco	2,70 Kg/m ³
Densidad neta	2,77 Kg/m ³
Absorción de agua	0,99%

Tabla n°3, Densidades grava. Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos en laboratorio.

Arenas: bajo la norma NCh 1239 que establece los procedimientos para determinar las densidades real y neta y la absorción de agua de los áridos finos o arenas de densidad real normal.

El procedimiento consiste en determinar la masa de una muestra de ensayo en condiciones seca y saturada superficialmente seca. Luego se determina su volumen como la masa de agua desplazada por el árido sumergido en un matraz aforado. Finalmente con los datos obtenidos se calculan las densidades real y neta y la absorción del agua en función de los valores obtenidos en las diferentes condiciones.

Densidad real del árido saturado superficialmente seco	2,70 Kg/m ³
Densidad real del árido seco	2,66 Kg/m ³
Densidad neta	2,77 Kg/m ³
Absorción de agua	1,52%

Tabla n°4, Densidad arena. Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos en laboratorio.

- **Densidad aparente**

Bajo la norma NCh 1116:2008 que establece los procedimientos para determinar la densidad aparente de los áridos, la cual puede ser suelta o compactada.

Para determinar la densidad aparente suelta el procedimiento consiste en vaciar el árido en una medida de capacidad volumétrica especificada de acuerdo al tamaño nominal del árido, eliminado el exceso de árido empleando una varilla pisón, sin presionar. Luego se obtiene la densidad aparente dividiendo la masa del árido que llena la medida por la capacidad volumétrica de la medida para dos muestra gemelas, expresando el resultado como el promedio aritmético de los dos ensayos.

Para determinar la densidad aparente compacta se llena la medida en tres capas de espesores aproximadamente iguales. Luego se empareja cada capa y se compacta cada una mediante 25 golpes de pisón uniformemente repartidos. La primera capa se apisona en todo su espesor y las capas superiores haciendo penetrar el pisón en la capa inferior. Finalmente se elimina el exceso de árido empleando la varilla pisón como regla de enrase, sin presionar. Luego se obtiene la densidad aparente dividiendo la masa del árido compactado que llena la medida por la capacidad volumétrica de la medida.

Densidad	Grava	Arena
Aparente Compactada	1,61 Kg/m ³	1,80 Kg/m ³
Aparente Suelta	1,48 Kg/m ³	1,68 Kg/m ³

Tabla n°5, Densidades aparente compactada y suelta, gravas y arena. Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos en laboratorio.

- **Material fino menos que 0,080 mm**

Bajo el procedimiento establecido en la norma NCh 1223, el cual consiste en homogeneizar la muestra en estado húmedo para luego reducirla por cuarteo y someterla a secado a 110°C. Posteriormente la muestra debe colocarse en el recipiente de lavado y agregar agua potable agitando la muestra para separar el material más fino, dejándolo en suspensión. El agua se debe vaciar a través de los tamices 1,18 mm y 0,075mm tantas veces como sea necesario hasta que el agua permanezca limpia y clara. Se reúne el material retenido en ambos tamices y se seca.

Terminada la separación el material fino mediante lavado y tamizado se expresa la pérdida de material respecto a la masa inicial.

Partículas menores que 0,080 mm	3,09%
---------------------------------	-------

Tabla n°6, Partículas menores que 0,080mm. Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos en laboratorio.

2.2.3 DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE DOCILIDAD A HORMIGONES DE PRUEBA

Con el fin de evaluar el desempeño del hormigón en estado fresco fabricado con agua reutilizada directamente del lavado interior de camión mixer se determinará la docilidad de los tres hormigones de prueba anteriormente mencionados mediante el método de ensayo de asentamiento de cono de Abrams especificado en la norma NCh1019:2009.

Para ello se extraerá una muestra representativa del total de la amasada de cada uno de los hormigones de prueba y se someterán al ensayo para comparar su docilidad. Permitiendo de esta manera evaluar de manera cuantitativa y cualitativa el impacto real de la utilización de agua reciclada del lavado interior de camión mixer respecto al desempeño y mantención de cono de las mezclas en estado fresco.

2.2.4 DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE RESISTENCIA MECÁNICA A HORMIGONES DE PRUEBA

Para cuantificar el impacto que se produce con la reutilización del agua de lavado interior del camión mixer respecto a su estado endurecido se determinará y evaluará la resistencia mecánica de cada uno de los hormigones de prueba anteriormente mencionados bajo la norma de ensayo de compresión de probetas cúbicas NCh1037.

Esta norma establece el método para efectuar el ensayo a la rotura por compresión de probetas cúbicas de hormigón. Este ensayo permitirá obtener información cuantitativa para comparar la resistencia a la compresión a los 14 y 28 días de cada uno de los hormigones de prueba fabricados.

Para ello se realizarán ensayos a probetas de hormigón patrón que cumple con la norma NCh1498:2012, probetas de hormigón con un determinado porcentaje de agua reciclada en su agua de amasado y a probetas de hormigón con agua de amasado 100% reutilizada del lavado interior mixer.

Para realizar la evaluación final respecto a la utilización del agua reciclada del lavado interior del camión mixer se analizará y cuantificará la variación, que se genere o no, entre el hormigón patrón y las probetas de prueba en cuanto a resistencias a la compresión, docilidad y comportamiento de cono.

2.3 DETALLE PROCEDIMIENTOS ENSAYOS A HORMIGONES DE PRUEBA

2.3.1 Método del asentamiento de cono de Abrams (NCh1019:2009)

Este ensayo permite medir la docilidad a través de la disminución de altura que experimente el hormigón fresco durante el ensayo, que no debe superar los 3 minutos durante toda su realización.

Procedimiento:

1. El proceso comienza con la extracción de una muestra de hormigón representativa para el ensayo junto con el acondicionamiento de los equipos requeridos (molde cónico, plancha de apoyo, puruña de llenado y varilla-pisón) humedeciéndolos de manera de no restar humedad a la mezcla de hormigón.
2. A continuación el operador del ensayo se posiciona sobre la plancha de apoyo horizontal y sobre las pisaderas del molde cónico para efectuar el llenado con hormigón de este.
3. El llenado del molde se realiza a través de 3 capas de igual volumen distribuidas uniformemente en toda la sección del molde, apisonadas cada una con 25 golpes efectuadas con la varilla-pisón.

Capa inferior:

Esta capa es apisonada en toda su profundidad, la mitad de los 25 golpes se realizan con la varilla-pisón ligeramente inclinada alrededor del perímetro del molde, los golpes restantes se realizan con la varilla-pisón en posición vertical.

Capa intermedia:

Esta capa llena con hormigón fresco $2/3$ del volumen del molde y es apisonada con 25 golpes con varilla-pisón penetrando sólo algunos centímetros de la capa inferior distribuyendo el hormigón uniformemente.

Capa superior:

Esta capa llena el cono hasta desbordarlo con hormigón fresco y al igual que la capa intermedia se apisona con 25 golpes con varilla-pisón penetrando solo unos centímetros de la capa media.

4. Terminada la compactación se realiza el enrase de la capa superior haciendo rotar la varilla-pisón sobre el borde superior del molde y sin efectuar movimientos de las pisaderas del molde se realiza la limpieza del hormigón derramado sobre la plancha de apoyo y el mismo molde cónico.
5. Inmediatamente terminado el llenado, enrase y limpieza del molde se realiza el levantamiento del molde de manera manual a través de las asas del mismo, para ello se retiran los pies de las pisaderas y se retira el molde en dirección vertical en un lapso de tiempo de 5 a 10 segundos.
6. Finalmente se efectúa la medición del asentamiento, para ello se coloca el molde invertido frente al hormigón asentado y junto a la colocación de la varilla-pisón en el borde superior del molde y de manera que se extienda sobre la muestra de hormigón se mide con huincha la altura entre el centro de la cara superior del hormigón asentado y la varilla-pisón.

Esta altura es el asentamiento del hormigón.

2.3.2 Ensayo de compresión de probetas cúbicas

Previamente a la realización de este ensayo se debe efectúa el acondicionamiento de probetas según NCh1017:2009. Esta norma establece los procedimientos para confeccionar y curar probetas de hormigón fresco destinadas a ensayos de compresión.

- Procedimiento previo:
 1. Se preparan las probetas cúbicas aplicando una delgada película de aceite desmoldante sobre las caras de las probetas que entran en contacto con el hormigón.
 2. Posteriormente se realiza la colocación del hormigón en las probetas cúbicas para compactar con vibrador.
 3. Luego se efectúa en el enrase y alisado del hormigón superficial con un arrasador a través de un movimiento aserrado desde el centro de la sección de la probeta hacia los extremos.
 4. A continuación se realiza el curado de las probetas, el que inicialmente consiste en evitar la evaporación y mantener la temperatura de ellas mediante el recubrimiento con una lámina plástico de la superficie expuesta al aire para posteriormente desmoldar luego de 20 horas. En particular las probetas se dejaron expuestas a la intemperie por 4 días, dada la no disponibilidad de las piscinas de curado.
 5. Seguidamente se realiza el curado de las probetas desmoldadas, se realiza mediante la sumersión de las probetas en una piscina de agua tranquila.
 6. Finalmente se extraen del agua para realizar el curado en laboratorio hasta que el momento del ensayo de resistencia a la compresión (a los 14 y 28 días de edad) cuidando las condiciones de humedad y temperatura.

- Procedimiento ensayo de compresión:
 1. Realizar la medición de probetas cubicas midiendo ancho y largo las 4 caras laterales de la probetas junto con la determinación de su masa mediante una balanza.
 2. Limpia la superficie de colocado de las probetas de hormigón desmoldadas se esta se posiciona en la placa inferior de la prensa alineando su eje central con el centro de esta placa. Formado un plano perpendicular entre ambas. Asentar la placa superior y ejercer la carga en forma continua, sin choques y velocidad uniforme. Obteniendo de esta forma la carga máxima de rotura (P), expresada en N (kgf).
 3. Finalmente se calcula la resistencia a la compresión como la carga máxima de rotura aplicada por la prensa de ensayo y la sección de ensayo de la probeta.

2.4 DETALLE DOSIFICACIÓN FINAL DE HORMIGONES DE PRUEBA

Dado a que los áridos a utilizar para la fabricación de los hormigones de prueba se encontraban acopiados a la intemperie y dadas las condiciones climáticas de las estación del año en el mes de julio, se efectuaron las correcciones de humedad de áridos pertinentes a la dosificación mencionada a continuación, a través de ensayos de humedad tanto a la arena como la grava bajo la NCh 1515:1979.

- **Procedimiento para el cálculo de contenido de humedad**

Consiste en tomar una muestra del árido pesarla en su estado húmedo. Luego someterla a horno por un tiempo determinado de tal manera que la muestra del árido quede en estado seco. Finalmente la muestra en estado seco es pesada para posteriormente calcular el porcentaje de humedad mediante la fórmula que se detalla a continuación. A su vez se consideran los siguientes porcentajes de absorción dados informe de los áridos empleados:

Arena: 1,5 %

Grava: 0,8%

Contenido de humedad (W) de la muestra:

$W = (Mh - Ms) / (Ms - Mr) * 100 (\%)$, donde:

Mh = Peso recipiente más la muestra de suelo húmedo (g)

Ms = Peso recipiente más la muestra de suelo seca (g)

Mr = Peso recipiente (g)

- **Dosificación inicial para 40 litros de hormigón**

Agua	8,4 litros
Arena	50,6 Kg
Grava	25,2 Kg
Cemento	12,24 Kg

Tabla n°7, Dosificación. Fuente: Elaboración propia a partir de dosificación Ready Mix.

A la vez se realizó la corrección de arena dados los aportes de finos por parte de agua reciclada del lavado del camión mixer y por ajuste de cono.

2.4.1 DOSIFICACIÓN FINAL HORMIGÓN PATRÓN

- Corrección por humedad arena

$$W \text{ Arena} = [(2045 \text{ g} - 1960 \text{ g}) / (1960 \text{ g} - 1045 \text{ g})] * 100 (\%) = 9,3\%$$

$$W \text{ Arena} - \text{Absorción arena} = 9,3\% - 1,5\% = 7,8 \%$$

$$(50,6 \text{ kg} / 100\%) = (X / 7,8) \rightarrow 3,94 \text{ Kg}$$

- Corrección por humedad grava

$$W \text{ Grava} = [(2045 \text{ g} - 2030 \text{ g}) / (2030 \text{ g} - 1045 \text{ g})] * 100 (\%) = 1,5\%$$

$$W \text{ Grava} - \text{Absorción Grava} = 1,5\% - 0,8\% = 0,7 \%$$

$$(25,2 \text{ kg} / 100\%) = (X / 0,7) = 0,17 \text{ Kg}$$

$$\text{Corrección de agua total} = 3,94 \text{ L} + 0,17 \text{ L} = 4,11 \text{ L}$$

- Dosificación final Hormigón Patrón

$$\text{Agua} = 8,4 \text{ L} - 4,11 \text{ L} = 4,29 \text{ L} + 3,85 \text{ L (ajuste de cono)} = 8,14 \text{ L}$$

$$\text{Arena} = 50,6 \text{ Kg} + 3,94 \text{ Kg} = 54,54 \text{ Kg}$$

$$\text{Grava} = 25,2 \text{ Kg} + 0,17 \text{ Kg} = 25,37 \text{ Kg}$$

$$\text{Cemento} = 12,24 \text{ Kg}$$

2.4.2 DOSIFICACIÓN FINAL HORMIGÓN 25%

- **Corrección por humedad arena**

$$W \text{ Arena} = [(2050 \text{ g} - 1955 \text{ g}) / (1955 \text{ g} - 1050 \text{ g})] * 100 (\%) = 10,49\%$$

$$W \text{ Arena} - \text{Absorción arena} = 10,49\% - 1,5\% = 8,9 \%$$

$$(50,6 \text{ kg} / 100\%) = (X / 8,9) \rightarrow 4,5 \text{ Kg}$$

- **Corrección por humedad grava**

$$W \text{ Grava} = (2050 \text{ g} - 1955 \text{ g}) / (2050 \text{ g} - 1050 \text{ g}) * 100 (\%) = 1,5\%$$

$$W \text{ Grava} - \text{Absorción Grava} = 1,5\% - 0,8\% = 0,72 \%$$

$$(25,2 \text{ kg} / 100\%) = (X / 0,72) \rightarrow 0,18 \text{ Kg}$$

$$\text{Corrección de agua total} = 4,5 \text{ L} + 0,18 \text{ L} = 4,68 \text{ L}$$

- **Corrección por agua reciclada**

$$\text{Masa de 1 litro de agua potable} = 1 \text{ Kg}$$

$$\text{Masa de 1 litro de agua reciclada} = 1,005 \text{ Kg}$$

$$\text{Aporte de finos por litro de agua reciclada} = 0,005 \text{ Kg}$$

- **Dosificación final Hormigón 25%**

$$\text{Agua} = 8,4 \text{ L} - 4,68 \text{ L} = 3,72 \text{ L} + 4,01 \text{ L (ajuste de cono)} = 7,73 \text{ L}$$

$$\rightarrow \text{Agua potable} = 5,79 \text{ L}$$

$$\rightarrow \text{Agua reciclada} = 1,93 \text{ L} * 1,005 \text{ (por aporte finos de agua reciclada)} = 1,94 \text{ L}$$

$$\text{Arena} = 50,6 \text{ Kg} + 4,5 \text{ Kg} = 55,1 \text{ Kg} - 0,00965 \text{ (por aporte finos de agua reciclada)} = 55,09 \text{ kg}$$

$$\text{Grava} = 25,2 \text{ Kg} + 0,17 \text{ Kg} = 25,37 \text{ Kg}$$

$$\text{Cemento} = 12,24 \text{ Kg}$$

2.4.3 DOSIFICACIÓN FINAL HORMIGÓN 50%

- **Corrección por humedad arena**

$$W \text{ Arena} = (2050 \text{ g} - 1955 \text{ g}) / (1955 \text{ g} - 1050 \text{ g}) * 100 (\%) = 10,49\%$$

$$W \text{ Arena} - \text{Absorción arena} = 10,49\% - 1,5\% = 8,9 \%$$

$$(50,6 \text{ kg} / 100\%) = (X / 8,9) = 4,5 \text{ Kg}$$

- **Corrección por humedad grava**

$$W \text{ Grava} = (2050 \text{ g} - 1955 \text{ g}) / (2050 \text{ g} - 1050 \text{ g}) * 100 (\%) = 1,5\%$$

$$W \text{ Grava} - \text{Absorción Grava} = 1,5\% - 0,8\% = 0,72 \%$$

$$(25,2 \text{ kg} / 100\%) = (X / 0,72) = 0,18 \text{ Kg}$$

$$\text{Corrección de agua total} = 4,5 \text{ L} + 0,18 \text{ L} = 4,68 \text{ L}$$

Corrección por agua reciclada

$$\text{Masa de 1 litro de agua potable} = 1 \text{ Kg}$$

$$\text{Masa de 1 litro de agua reciclada} = 1,005 \text{ Kg}$$

$$\text{Aporte de finos por litro de agua reciclada} = 0,005 \text{ Kg}$$

- **Dosificación final Hormigón 50%**

$$\text{Agua} = 8,4 \text{ L} - 4,68 \text{ L} = 3,72 \text{ L} + 4,03 \text{ L (ajuste de cono)} = 7,75 \text{ L}$$

$$\rightarrow \text{Agua potable} = 3,88 \text{ L}$$

$$\rightarrow \text{Agua reciclada} = 3,88 \text{ L} \times 1,005 \text{ (por aporte finos de agua reciclada)} = 3,88 \text{ L}$$

$$\text{Arena} = 50,6 \text{ Kg} + 4,5 \text{ Kg} = 55,1 \text{ Kg} - 0,019 \text{ (por aporte finos de agua reciclada)} \\ \text{kg} = 55,09 \text{ kg}$$

$$\text{Grava} = 25,2 \text{ Kg} + 0,17 \text{ Kg} = 25,37 \text{ Kg}$$

$$\text{Cemento} = 12,24 \text{ Kg}$$

2.2.4 DOSIFICACIÓN HORMIGÓN 100%

- **Corrección por humedad arena**

$$W \text{ Arena} = [(2050 \text{ g} - 1980 \text{ g}) / (1980 \text{ g} - 1050 \text{ g})] * 100 (\%) = 7,5\%$$

$$W \text{ Arena} - \text{Absorción arena} = 7,5\% - 1,5\% = 6,03 \%$$

$$(50,6 \text{ kg} / 100\%) = (X / 6,03) \rightarrow 3,05 \text{ Kg}$$

- **Corrección por humedad grava**

$$W \text{ Grava} = [(2050 \text{ g} - 2040 \text{ g}) / (2040 \text{ g} - 1050 \text{ g})] * 100 (\%) = 1,0\%$$

$$W \text{ Grava} - \text{Absorción Grava} = 1,0\% - 0,8\% = 0,2 \%$$

$$(25,2 \text{ kg} / 100\%) = (X / 0,2) = 0,05 \text{ Kg}$$

$$\text{Corrección de agua total} = 3,05 \text{ L} + 0,10 \text{ L} = 5,3 \text{ L}$$

Corrección por agua reciclada

$$\text{Masa de 1 litro de agua potable} = 1 \text{ Kg}$$

$$\text{Masa de 1 litro de agua reciclada} = 1,005 \text{ Kg}$$

$$\text{Aporte de finos por litro de agua reciclada} = 0,005 \text{ Kg}$$

- **Dosificación final Hormigón 100%**

$$\text{Agua} = 8,4 \text{ L} - 3,10 \text{ L} = 5,3 \text{ L} + 5,09 \text{ (por ajuste de cono)} = 10,39 \text{ L}$$

$$\rightarrow \text{Agua reciclada} = 10,39 \text{ L} * 1,005 \text{ (por aporte finos de agua reciclada)} = 10,44 \text{ L}$$

$$\text{Arena} = 50,6 \text{ Kg} + 3,05 \text{ Kg} = 53,65 \text{ Kg} - 0,05 \text{ (por aporte de finos por litro de agua reciclada)} \text{ kg} = 53,60 \text{ kg}$$

$$\text{Grava} = 25,2 \text{ Kg} + 0,05 \text{ Kg} = 25,25 \text{ Kg}$$

$$\text{Cemento} = 12,24 \text{ Kg}$$

- Resumen dosificación final para 40 litros de hormigón

Hormigón De prueba	Cemento [Kg]	Gravilla [Kg]	Arena [Kg]	Agua Potable [L]	Agua Reciclada [L]
Patrón H30(90)20-10	12,24	25,37	54,54	8,14	-
H100%	12,24	25,25	53,60	-	10,44
H50%	12,24	25,38	55,09	3,87	3,87
H25%	12,24	25,38	55,09	5,29	1,93

Tabla n°8, Dosificación final empleada en hormigones de prueba. Fuente: Elaboración propia a partir corrección y fabricación en laboratorio.

CAPITULO III: Resultados y análisis de datos

3.1 Expresión de resultados

3.1.1 Asentamiento cono de Abrams

Hormigón De prueba / Asentamiento De Cono	0´	30´	60´	90´
Patrón H30(90)20-10	10	6	4	2
H100%	10	3	2,7	1,6
H50%	10	3	2,8	1,6
H25%	10	4	3,5	1,7

Tabla n°9, Asentamiento de cono de Abrams de hormigones de prueba. Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos en laboratorio.

Vista gráfica de tendencia de asentamiento cono en hormigones de prueba

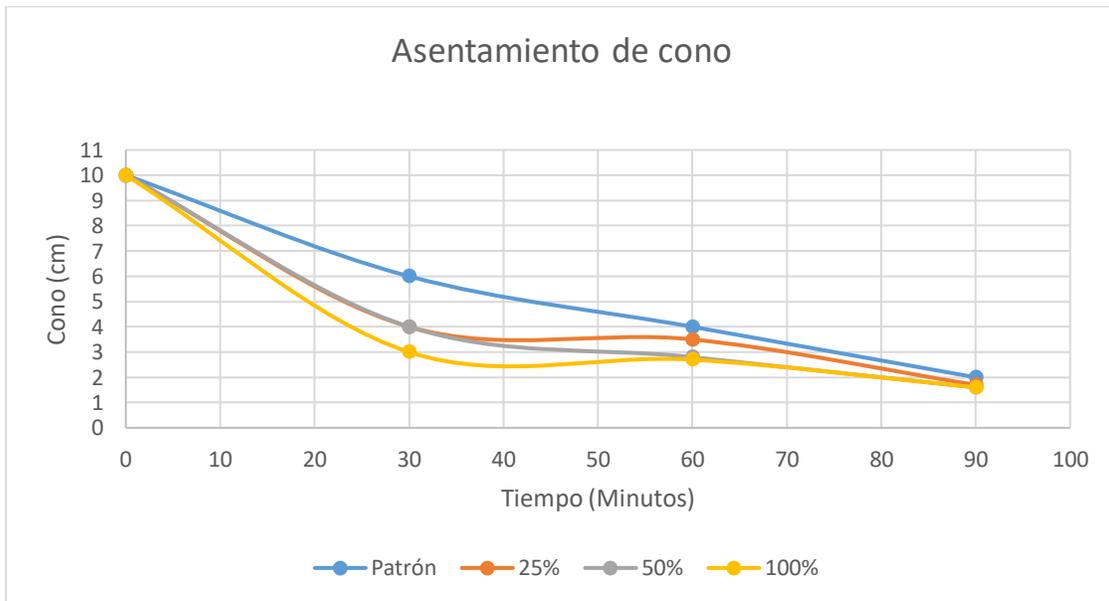


Gráfico n°2, Asentamiento de cono de Abrams en hormigones de prueba. Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos en laboratorio.

3.1.2 Características cualitativas en hormigones de prueba

- **En estado fresco**

Hormigón de prueba	Características cualitativas en estado fresco
H Patrón	Sin fisuración al tiempo cero No presenta exudación Buena trabajabilidad Consistencia blanda a los 30 minutos y plástica a los 60 minutos
H 25%	Sin fisuración al tiempo cero No presenta exudación Caída de trabajabilidad luego de 30 minutos Consistencia seca a los 90 minutos
H 50%	Sin fisuración al tiempo cero No presenta exudación Caída de trabajabilidad luego de 30 minutos Consistencia seca a los 60 minutos
H 100%	Sin fisuración al tiempo cero No presenta exudación Caída de trabajabilidad luego de 30 minutos Consistencia blanda a los 30 minutos y seca a los 60 minutos

Tabla n°10, Características cualitativas de hormigones de prueba en estado fresco. Fuente: Elaboración propia a partir de visualización en laboratorio.

- **En estado endurecido**

Hormigón de prueba	Características cualitativas en estado endurecido
H Patrón	No presenta grietas No hay daños superficiales No hubo desintegración al desmolde de la probeta cúbica No presenta nidos de piedra No presenta cambios volumétricos
H 25%	No presenta grietas No hay daños superficiales No hubo desintegración al desmolde de la probeta cúbica No presenta nidos de piedra No presenta cambios volumétricos
H 50%	No presenta grietas No hay daños superficiales No hubo desintegración al desmolde de la probeta cúbica No presenta nidos de piedra No presenta cambios volumétricos
H 100%	No presenta grietas No hay daños superficiales No hubo desintegración al desmolde de la probeta cúbica No presenta nidos de piedra No presenta cambios volumétricos

Tabla n°10, Características cualitativas de hormigones de prueba en estado endurecido. Fuente:

Elaboración propia a partir de visualización en laboratorio

3.1.3 Resistencia a la compresión de hormigones de prueba

Hormigón De prueba / Resistencia mecánica	Patrón H30(90)20- 10	H100%	H50%	H25%
14 días	31,3	3,2,3	30,5	28,1
28 días	48,8	50,4	46,7	43,5

Tabla n°12, Resistencia a la compresión de hormigones de prueba. Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos en laboratorio.

(Ver anexo A, cálculo de resistencias a la compresión)

Vista gráfica de tendencia de cono en hormigones de prueba

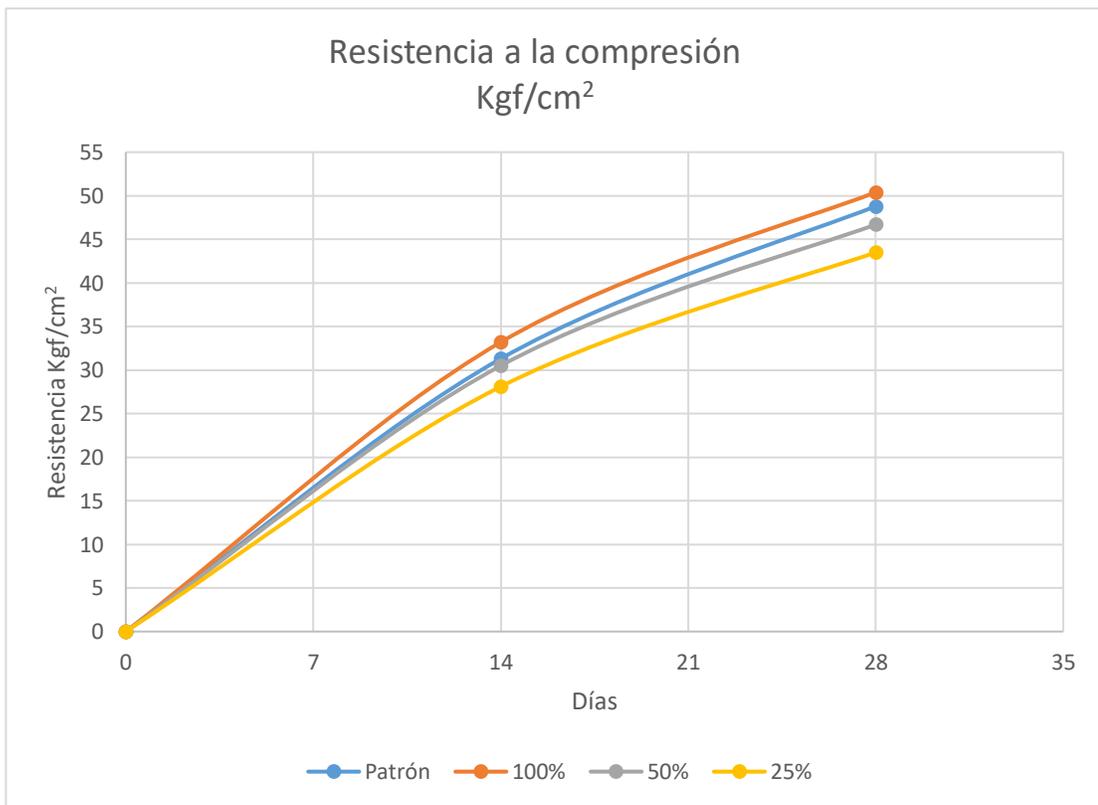


Gráfico n°3, Asentamiento de cono de Abrams en hormigones de prueba. Fuente: Elaboración propia a partir de ensayos en laboratorio

3.1.4 DEMANDA DE AGUA INCORPORADA SOBRE DOSIFICACIÓN

Con el fin de alcanzar cono 10 en los hormigones de prueba se incorporaron las siguientes cantidades de agua extras sobre la dosificación inicial de los hormigones de prueba.

Hormigón de prueba	Agua incorporada (L)
H Patrón	3,85
H 25%	4,01
H 50%	4,03
H 100%	5,09

Tabla n°13, Agua incorporada sobre dosificación. Fuente: Elaboración propia a partir de fabricación de hormigones de prueba en laboratorio

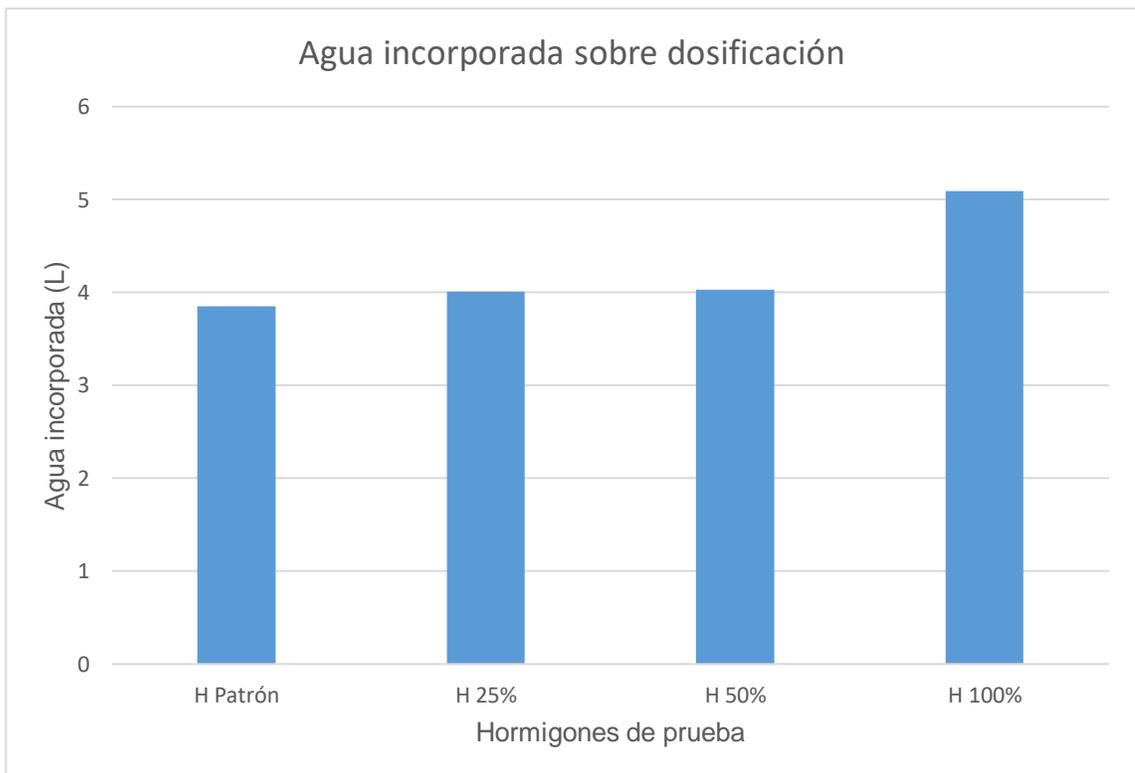


Gráfico n°4, Agua incorporada sobre dosificación. Fuente: Elaboración propia a partir de fabricación de hormigones de prueba en laboratorio.

3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los datos obtenidos respecto a la docilidad de los hormigones de prueba dado el ensayo de asentamiento de cono de Abrams arrojan que el mejor comportamiento lo presenta el hormigón patrón debido a que mantiene una consistencia blanda a los 30 minutos, en cambio, los hormigones de prueba al 25%, 50%, 100 % de agua reciclada presentan en ese momento un consistencia plástica dada la tabla de clasificación del hormigón según el asentamiento de cono:

Consistencia	Cono de Abram (cm)
Seco	< 2
Plástico	3 - 5
Blando	6 - 9
Fluido	>10

Tabla n°14, Consistencia respecto a cono de Abrams. Fuente: Apuntes tecnología del hormigón.

Esta caída brusca en la docilidad de los hormigones de prueba evidencia que la utilización del agua reciclada provoca alguna reacción química ya que está constituida por material fino o polvo de los áridos más cemento de diversos hormigones fabricados en la planta de hormigón de donde procede. Este contenido de finos incrementa la demanda de agua provocando una pérdida de docilidad en los hormigones de prueba. Fundamentado también mediante la evidencia de que la caída de docilidad no fue provocada por evaporación del agua dado a que las temperaturas en los días en los cuales fueron fabricados los hormigones no superaron los 11°C. Además el contenido de cemento que forma parte del agua reciclada genera una reacción interna dentro de la masa de hormigón generando un posible aumento en la temperatura de la mezcla disminuyendo así la trabajabilidad y asentamiento de los hormigones de prueba, dado a que a mayor porcentaje de agua reciclada utilizada en la fabricación de ellos menor es el asentamiento de cono de los mezclas de hormigón fresco.

Los datos obtenidos respecto a las resistencias a la compresión para el hormigón patrón H30(90)20-10 y los hormigones fabricados con agua reciclada a los 14 y 28 días están por debajo de la resistencia esperada (300 kgf/cm²). Esta anomalía en las resistencias en los hormigones de prueba pudo ser afectada por el curado que recibió dado a que en el mes fueron fabricados y curados, fue uno de los meses más frío del año en Santiago según la red de meteorología de Chile. (Ver gráfica n°4)

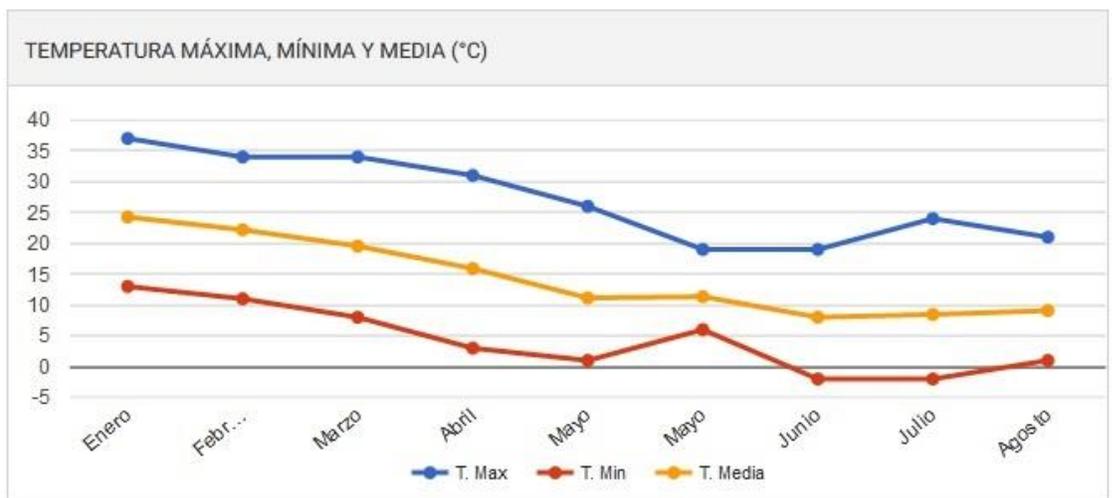


Gráfico n°5, Temperaturas promedio mensual año 2017.

Fuente: https://www.meteored.cl/tiempo-en_Santiago+de+Chile-America+Sur-Chile-Region+Metropolitana+de+Santiago-SCEL-sactual-18578.html

Junto con ello las probetas recibieron 4 días de curado en piscina con agua con temperatura de 10°C y 24 días a la intemperie envueltas en plástico. Estas condiciones intervinieron retardando el fraguado del hormigón y el desarrollo de las resistencias mecánicas. A demás se estima que un hormigón con resistencia de 50 kgf/cm² no presenta congelamiento del agua de amasado, por lo tanto las resistencias obtenidas que fluctúan entre los 28,1 y 50,4 kgf/cm² entre los 14 y 28 días en los hormigones de prueba evidencian la anomalía en las resistencias a la compresión obtenidas en los hormigones de prueba.

Otro factor que influyó en las bajas resistencias obtenidas fue el cemento empleado el cual se encontraba hidratado por lo que la cristalización de las partículas de cemento se encontraba ya activa afectando las reacciones químicas fundamentales dentro de la masa de hormigón elaborada.

Sin embargo es posible analizar los datos obtenidos respecto a las resistencias mecánicas de los hormigones de prueba. Los datos arrojan que el hormigón con mejor resistencia a la compresión es el hormigón fabricado 100% con agua reciclada la cual alcanzó los 50,4 Kgf/cm² v/s los 48,8 Kgf/cm² del hormigón patrón. Esto nos habla de una mayor compactación de la mezcla de hormigón provocada por el material fino aportados por el agua reciclada obtenida del lavado interior del camión mixer.

Otro factor sumamente importante son las características cualitativas de los hormigones de pruebas los cuales presentaron idéntico aspecto visual (sin presencia de grietas, sin daños superficiales, sin desintegración, sin nidos de piedra, sin cambios volumétricos).

Sumamente importante también como factor influyente en las resistencias obtenidas es la relación agua/cemento (A/C) empleada en la dosificación, para el hormigón patrón la razón A/C fue menor que la del hormigón fabricado con 100% agua reciclada. Si bien a menor relación A/C mayor son las resistencias obtenidas en el caso del hormigón patrón alcanzó menor resistencia a la compresión mientras que el hormigón elaborado 100% con agua reciclada respondió mejor en las resistencias finales.

En el caso de los hormigones de prueba fabricados con 50% y 25% de agua reciclada presentaron un peor comportamiento frente al hormigón patrón y al hormigón fabricado 100% con agua reciclada.

4. CONCLUSIÓN Y SUGERENCIAS

De acuerdo con los objetivos planteados en el comienzo de esta memoria en la cual se plantea como objetivo general la evaluación de desempeño de la reutilización del agua reciclada del lavado interior del camión mixer fue posible cumplir con los objetivos específicos al cuantificar el impacto que se produce con la reutilización del agua de lavado del camión mixer en las resistencias mecánicas y en el desempeño del hormigón en estado fresco.

Esta evaluación permitió establecer que la reutilización del agua es favorable en términos de resistencia mecánica ya que potencia la mezcla de hormigón en compacidad cuando el agua de amasado es 100% proveniente del lavado del camión mixer, superando así a hormigones fabricados con agua potable y a la vez no afecta su aspecto visual en su estado endurecido.

Respecto a la docilidad del hormigón es igual para todos los hormigones de prueba al momento cero, cuando el hormigón está recién fabricado, sin embargo la docilidad del hormigón se ve afectada luego de los 30 minutos de su fabricación en los hormigones fabricados con agua reciclada, lo que implicaría un rechazo de la mezcla en obra por los tiempos de transporte y colocación, dado a que a los 90 minutos el asentamiento de cono no supera los 2 cm.

Es por ello que se sugiere mejorar la dosificación con el uso de un aditivo Tipo D, Plasticantes retardador, de manera que aumente la docilidad y permita reducir el agua libre requerida para la docilidad solicitada, permitiendo además mejorar el desempeño de la razón A/C con la ayuda en la disminución de la reacción química entre el cemento y el agua de manera de retardar el inicio de fraguado.

Permitiendo de esta manera una mejor evaluación de la reutilización del agua de lavado de interior del camión mixer y llevar así esta propuesta y proceso a obra dado a su ayuda en cuando a la docilidad requerida para transporte y colocación

del hormigón. También es recomendable realizar el proceso en un clima que no esté con temperaturas extremas de manera que no afecte el curado ni la docilidad del hormigón ya sea por congelamiento de probetas o pérdidas de agua.

Con los resultados obtenidos se puede inferir que la reutilización del agua de lavado interior mixer es una alternativa viable, que permitirá el ahorro del agua y la disminución en la inversión económica que con lleva el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Permitiendo así un ahorro dadas las cifras dadas a conocer por el Instituto del Cemento y del Hormigón y la Cámara chilena de la construcción de 98.080 M3/año calculados en este estudio junto con un ahorro por año de nivel de país de \$80.916.000.

Finalmente este proceso de reutilización del agua de lavado del camión mixer permitirá reducir las actuales limitaciones sobre el uso del agua recuperada en la industria del hormigón y de esta manera enfrentar las estimaciones para el año 2025 que indican una creciente demanda por el recurso hídrico en el sector industrial y en donde los sectores de la economía nacional competirán por el uso de este valioso recurso natural.

BIBLIOGRAFÍA

- Bibko, (sf). Agua de proceso/Manejo del agua residual. Recuperado de, <http://www.bibko.com/es/aguas-de-procesomenejo-de-aguas-de-levado/>
- Matus, (2004). Recursos Hídricos en Chile. Recuperado de, <http://www.chilesustentable.net/wp-content/uploads/2004/01/RECURSOSHIDRICOS-en-Chile-desaf%C3%ACos-para-la-sustentabilidad.pdf>
- AA, (2017). Datos históricos en Santiago de Chile. Recuperado de, https://www.meteored.cl/tiempo-en_Santiago+de+Chile-America+Sur-Chile-Region+Metropolitana+de+Santiago-SCEL-sactual-18578.html
- AA. (2016). Tarifas vigentes servicios sanitarios. Recuperado de, <http://www.siss.gob.cl/577/w3-propertyvalue-3512.html>
- NCh 1019:2009 “Determinación de la docilidad – Método del asentamiento de cono de Abrams”, Instituto Nacional de Normalización.
- NCh 1037:2009 “Ensayo de compresión de probetas cubicas y cilíndricas”, Instituto Nacional de Normalización.
- NCh 1017:2009 “Confección y curado en obra de probetas de ensayos de compresión y flexión”, Instituto Nacional de Normalización
- NCh 165:2009 “Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría”, Instituto Nacional de Normalización.
- NCh 170:2016 “Hormigón – Requisitos generales”, Instituto Nacional de Normalización
- NCh 1498:2012 “Hormigón y mortero – Agua de amasado – Clasificación y requisitos”, Instituto Nacional de Normalización
- NCh 1117: 2010“Áridos para morteros y hormigones – Determinación densidad real y neta y absorción de agua de las gravas. Instituto Nacional de Normalización

- NCh 1239:2009 “Áridos para morteros y hormigones – Determinación densidad real y neta y absorción de agua de las arenas. Instituto Nacional de Normalización
- NCh 1223:1977 “Áridos para morteros y hormigones – Determinación del material fino menos 0,080 mm
- NCh 1116: 2008 “Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente. Instituto Nacional de Normalización
- NCh 1037:2009 “Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. Instituto Nacional de Normalización
- NCh 1515: 1979 “Mecánica de suelos – Determinación de la humedad. Instituto Nacional de Normalización
- NCh 2182:2010 “Hormigón y mortero – Aditivos – Clasificación y requisitos”

ANEXO A: CÁLCULOS RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN

Resistencia a la compresión a los 14 días

- **Hormigón patrón**

Datos:

Máquina de compresión: 122 KN

A1: 197 mm

A2: 197 mm

B1: 197 mm

B2: 198 mm

Superficie: $[(197 \text{ mm} + 197 \text{ mm}) / 2] * [(197 \text{ mm} + 198 \text{ mm}) / 2] = 38907,5 \text{ mm}^2$

Resistencia a la compresión:

$(122000 \text{ N} / 38907,5 \text{ mm}^2) = 3,13 \text{ MPa} \rightarrow 31,3 \text{ Kgf/ cm}^2$

- **Hormigón 25%**

Datos:

Máquina de compresión: 110 KN

A1: 198 mm

A2: 197 mm

B1: 198 mm

B2: 198 mm

Superficie: $[(198 \text{ mm} + 197 \text{ mm}) / 2] * [(198 \text{ mm} + 198 \text{ mm}) / 2] = 39105 \text{ mm}^2$

Resistencia a la compresión:

$$(110000 \text{ N} / 39105\text{mm}^2) = 2,81 \text{ MPa} \rightarrow 28,1 \text{ Kgf/ cm}^2$$

- **Hormigón 50%**

Datos:

Máquina de compresión: 120 KN

A1: 198 mm

A2: 198 mm

B1: 198 mm

B2: 199 mm

$$\text{Superficie: } [(198 \text{ mm} + 198 \text{ mm}) / 2] * [(198 \text{ mm} + 199 \text{ mm}) / 2] = 39303 \text{ mm}^2$$

Resistencia a la compresión:

$$(120000 \text{ N} / 39303\text{mm}^2) = 3,05 \text{ MPa} \rightarrow 30,5 \text{ Kgf/ cm}^2$$

- **Hormigón 100%**

Datos:

Máquina de compresión: 128 KN

A1: 198 mm

A2: 198 mm

B1: 195 mm

B2: 195 mm

$$\text{Superficie: } [(198 \text{ mm} + 198 \text{ mm}) / 2] * [(195 \text{ mm} + 195 \text{ mm}) / 2] = 38610 \text{ mm}^2$$

Resistencia a la compresión:

$$(128000 \text{ N} / 38610 \text{ mm}^2) = 3,32 \text{ MPa} \rightarrow 33,2 \text{ Kgf/ cm}^2$$

Resistencia a la compresión a los 28 días

- **Hormigón patrón** (2 probetas c/u)

Datos:

Probeta N°1

Máquina de compresión: 190 KN

A1: 198 mm

A2: 198 mm

B1: 198 mm

B2: 199 mm

$$\text{Superficie: } [(198 \text{ mm} + 198 \text{ mm}) / 2] * [(198 \text{ mm} + 199 \text{ mm}) / 2] = 39303 \text{ mm}^2$$

Resistencia a la compresión:

$$(190000 \text{ N} / 39303 \text{ mm}^2) = 4,83 \text{ MPa} \rightarrow 48,3 \text{ Kgf/ cm}^2$$

Probeta N°2

Máquina de compresión: 195 KN

A1: 199 mm

A2: 199 mm

B1: 197 mm

B2: 197 mm

$$\text{Superficie: } [(199 \text{ mm} + 199 \text{ mm}) / 2] * [(197 \text{ mm} + 197 \text{ mm}) / 2] = 39601 \text{ mm}^2$$

Resistencia a la compresión:

$$(195000 \text{ N} / 39601 \text{ mm}^2) = 4,92 \text{ MPa} \rightarrow 49,2 \text{ Kgf/ cm}^2$$

Promedio: 48,8 Kgf/ cm²

- **Hormigón 100%** (2 probetas c/u)

Datos:

Probeta N°1

Máquina de compresión: 195 KN

A1: 199 mm

A2: 197 mm

B1: 201 mm

B2: 197 mm

$$\text{Superficie: } [(199 \text{ mm} + 197 \text{ mm}) / 2] * [(201 \text{ mm} + 197 \text{ mm}) / 2] = 39402 \text{ mm}^2$$

Resistencia a la compresión:

$$(195000 \text{ N} / 39402 \text{ mm}^2) = 4,95 \text{ MPa} \rightarrow 49,5 \text{ Kgf/ cm}^2$$

Probeta N°2

Máquina de compresión: 205 KN

A1: 201 mm

A2: 201 mm

B1: 197 mm

B2: 197 mm

Superficie: $[(201 \text{ mm} + 201 \text{ mm}) / 2] * [(201 \text{ mm} + 197 \text{ mm}) / 2] = 39999 \text{ mm}^2$

Resistencia a la compresión:

$(205000 \text{ N} / 39999 \text{ mm}^2) = 5,13 \text{ MPa} \rightarrow 51,3 \text{ Kgf/ cm}^2$

Promedio: $50,04 \text{ Kgf/ cm}^2$

- **Hormigón 50%** (2 probetas c/u)

Datos:

Probeta N°1

Máquina de compresión: 180 KN

A1: 198 mm

A2: 199 mm

B1: 198 mm

B2: 200 mm

Superficie: $[(198 \text{ mm} + 199 \text{ mm}) / 2] * [(198 \text{ mm} + 200 \text{ mm}) / 2] = 39501,5 \text{ mm}^2$

Resistencia a la compresión:

$(180000 \text{ N} / 39501,5 \text{ mm}^2) = 4,56 \text{ MPa} \rightarrow 45,6 \text{ Kgf/ cm}^2$

Probeta N°2

Máquina de compresión: 185 KN

A1: 197 mm

A2: 197 mm

B1: 197 mm

B2: 197 mm

Superficie: $[(197 \text{ mm} + 197 \text{ mm}) / 2] * [(197 \text{ mm} + 197 \text{ mm}) / 2] = 38809 \text{ mm}^2$

Resistencia a la compresión:

$(185000 \text{ N} / 38809 \text{ mm}^2) = 4,77 \text{ MPa} \rightarrow 47,7 \text{ Kgf/ cm}^2$

Promedio: 46,7 Kgf/ cm²

- **Hormigón 25%** (2 probetas c/u)

Datos:

Probeta N°1

Máquina de compresión: 160 KN

A1: 197 mm

A2: 1987 mm

B1: 198 mm

B2: 1998mm

Superficie: $[(197 \text{ mm} + 197 \text{ mm}) / 2] * [(198 \text{ mm} + 198 \text{ mm}) / 2] = 39006 \text{ mm}^2$

Resistencia a la compresión:

$(160000 \text{ N} / 39006 \text{ mm}^2) = 4,10 \text{ MPa} \rightarrow 41,0 \text{ Kgf/ cm}^2$

Probeta N°2

Máquina de compresión: 185 KN

A1: 200 mm

A2: 201 mm

B1: 200 mm

B2: 201 mm

Superficie: $[(200 \text{ mm} + 201 \text{ mm}) / 2] * [(200 \text{ mm} + 201 \text{ mm}) / 2] = 40200,25 \text{ mm}^2$

Resistencia a la compresión:

$(185000 \text{ N} / 40200,25 \text{ mm}^2) = 4,60 \text{ MPa} \rightarrow 46,0 \text{ Kgf/ cm}^2$

Promedio: 43,5 Kgf/ cm²

GLOSARIO

Según nomas chilenas (NCh):

1. **Agua de amasado o agua libre:** agua que contiene el hormigón fresco, descontada el agua absorbida por los áridos hasta la condición de saturado superficialmente secos.
2. **Absorción de agua:** masa de agua necesaria para llevar un árido de estado seco a estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje del árido secado en estufa hasta masa constante.
3. **Aditivo plastificante:** material que aumenta la docilidad para un determinado contenido de agua o, permite reducir el agua libre requerida para obtener una docilidad dada.
4. **Aditivo retardador de fraguado:** Material que disminuye la velocidad de reacción química entre el cemento y el agua retrasando el inicio de fraguado.
5. **Aditivo plastificante retardador:** Material que combina las acciones de plastificante y retardador.
6. **Arena (árido fino):** árido que pasa por el tamiz de abertura nominal de 5 mm y es retenido en el de 0,080 mm.
7. **Árido:** material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables.
8. **Asentamiento de cono:** descenso que experimenta el hormigón fresco, determinado de acuerdo a esta norma y que sirve como medida práctica de la docilidad
9. **Camión Mixer:** Camión mezclador, vehículo en el cual se puede transportar hormigón fresco desde el sitio de elaboración hasta el sitio de colocación; mientras se agita el hormigón el cuerpo del camión puede estar estacionario y contener un agitador en

movimiento, o bien puede estar equipado con un tambor que gira de manera continua.

10. **Cemento:** Es un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire.
11. **Cemento portland:** Es el que se obtiene por molienda conjunta de clínker y yeso.
12. **Cemento puzolánico:** Producto de la molienda de clínker, puzolana y yeso.
13. **Densidad aparente:** densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de un árido, más el volumen de los poros y de los huecos. Este volumen corresponde a la capacidad de la medida que lo contiene.
14. **Docilidad:** facilidad del hormigón fresco para ser transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación.
15. **Dosificación:** las cantidades de los distintos materiales expresados en masa o volumen que constituyen un determinado volumen de hormigón.
16. **Grava (árido grueso):** árido retenido en el tamiz de abertura nominal de 5 mm.
17. **Granulometría de un árido:** distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido.
18. **Hormigón:** material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava, cemento, eventualmente aditivos y adiciones, en proporciones adecuadas que, al fraguar y endurecer, adquiere resistencia.
19. **Módulo de finura:** centésima parte de la suma de los porcentajes acumulados retenidos en los tamices de la serie preferida.
20. **Varilla-Pisón:** Herramienta de trabajo que se utiliza para la compactación del hormigón, a través de la energía suministrada manualmente.

21. **Resistencia mecánica:** tensión máxima que soporta el hormigón (de compresión, de tracción, de flexión, de hendimiento, etc.). Se expresa en MPa ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm} = 10 \text{ kgf/cm}$)