

Caracterización del comportamiento mecánico de probetas de mortero con reemplazo de relave de cobre

A. Ringele Saldías ¹, M. Villagrán Valenzuela ², C. Oyarzo Vera ³.

RESUMEN

Hoy en día, los depósitos generados por los residuos de la industria minera del cobre en Chile son cada vez más, y según estudios realizados por la Cámara Chilena del Cobre, se estiman en 915,4 millones de toneladas para el año 2026. Por esto se necesita una revalorización del relave de cobre, proponiendo su aplicación como reemplazo parcial en dosificaciones de morteros de hormigón. Para analizar la capacidad de su uso, se realizó un proceso investigativo experimental, con la finalidad de verificar su comportamiento mecánico, donde un porcentaje de cemento o árido fue reemplazado por relave de cobre. Para comenzar, se realizaron probetas sin reemplazo de relave de cobre, según las dosificaciones establecidas en el estudio, a continuación, se fabricaron probetas que contienen una cantidad de relave de cobre, haciendo posible la comparación con una muestra de control. Se realizan ensayos de flexión y compresión a las probetas, para reconocer alguna viabilidad en su uso basado en la resistencia mecánica adquirida durante el proceso de curado de las muestras. Luego, los resultados se comparan con los obtenidos por Cofre et al.,(2022). Se concluye que al reemplazar 10% de cemento por relave de cobre, se logran resistencias cercanas a las muestras de control, exhibiendo resultados que hacen factible su incorporación a las dosificaciones de mortero de hormigón, sin embargo, son las probetas con 30% y 50% de remplazo de árido por relave de cobre, las que obtiene resultados a compresión aun mejores en comparación con las muestras de control. Adicionalmente, los resultados de absorción muestran que las probetas que incorporan cantidades importantes de relave en la mezcla, adquieren características de alta impermeabilidad la que los hace atractivas para cierto tipo de hormigones especiales.

Palabras claves: Relave de cobre, revalorización, dosificación, resistencia mecánica.

ABSTRACT

Nowadays, the deposits generated by the copper mining industry waste in Chile are increasing, and according to studies carried out by the Chilean Copper Chamber, they are estimated at 915.4 million tons for the year 2026. For this reason, a revalorization of copper tailings is needed, proposing its application as a partial replacement in concrete mortar dosages. In order to analyze the capacity of its use, an experimental research process was carried out to verify its mechanical behavior, where a percentage of cement or aggregate was replaced by copper tailings. To begin with, specimens were made without copper tailings replacement, according to the dosages established in the study, then, specimens containing an amount of copper tailings were manufactured, making possible the comparison with a control sample. Flexure and compression tests are performed on the specimens, in order to recognize any feasibility in their use based on the mechanical resistance acquired during the curing process of the samples. Then, the results are compared with those obtained by Cofre et al. It is concluded that by replacing 10% of cement with copper tailings, strengths close to those of the control samples are achieved, showing results that make its incorporation to the concrete mortar dosages feasible. However, the specimens with 30% and 50% of aggregate replacement by copper tailings obtain even better compression results compared to the control samples. Additionally, the absorption results show that the specimens that incorporate important amounts of tailings in the mix, acquire high impermeability characteristics, which makes them attractive for certain types of special concretes.

Keywords: Copper tailings, revalorization, dosage, mechanical strength.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, aringele@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mvillagran@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, coyarzo@ucsc.cl

1 INTRODUCCIÓN

Según Pandey (2010), durante los últimos años se requiere en mayor medida el uso de nuevas materias primas para la aplicación de diversas tecnologías que permitan un desarrollo sustentable respecto al medio ambiente. Un ejemplo de esto es el uso de elementos biodegradables, la reutilización y revalorización de materiales que han sido históricamente considerados como desechos, especialmente desde la industria minera de cobre.

Debido a lo anterior, es necesario reducir diversos impactos ambientales, como las cantidades de monóxido de carbono y los desechos generados durante las distintas etapas de extracción del cobre. Este mineral es el de mayor abundancia en Chile, posicionado como indispensable para el desarrollo de la economía del país, cubriendo desde el 25% al 30% de la oferta mundial (Manual de Uso Público, O.2, 2020). Además, el cobre es utilizado en la producción de diversas tecnologías, debido a características como una alta conductividad eléctrica y térmica, resistencia a la corrosión e incluso considerado un material antimicrobiano.

Actualmente, el procesamiento de los minerales en los yacimientos de cobre es clasificado en dos principales grupos, minerales sulfurados y minerales oxidados, cada uno con una técnica distinta de tratamiento para la extracción del mineral. El tratamiento para minerales sulfurados como el cobre (típicos de la industria cuprífera chilena) es realizado en plantas de concentración, con procesos que involucran la molienda del mineral, clasificación, flotación, espesamiento, etc., cuyo resultado final es la producción de un concentrado de cobre, y a su vez, un gran volumen de residuos, que se denomina relave y cuyo proceso se esquematiza en la **Figura 1**.

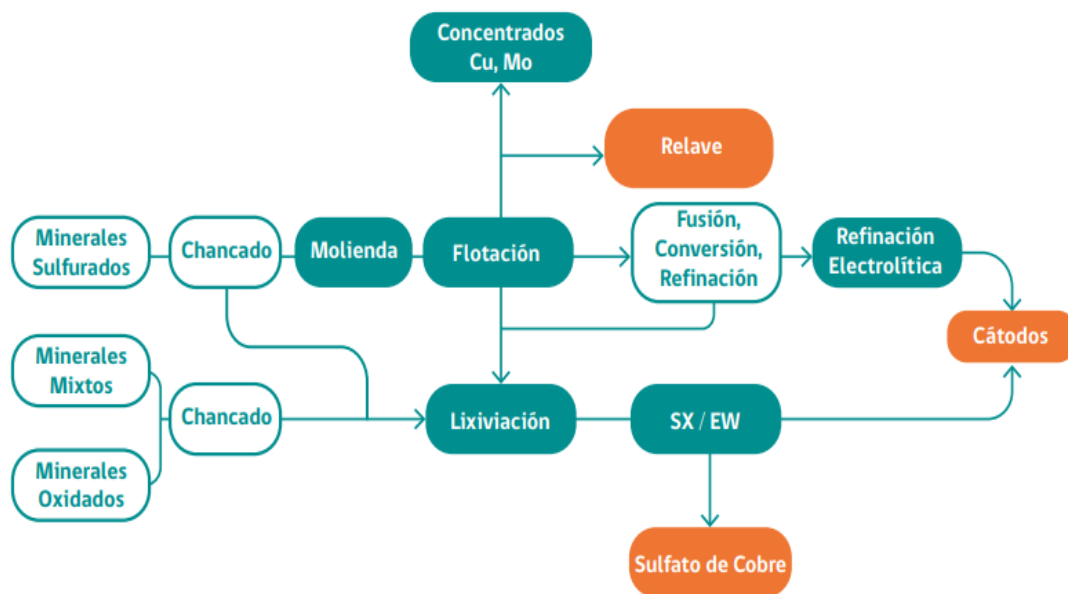


Figura 1:Proceso de Obtención de Cobre.

Fuente: Plan Nacional de Depósitos de Relave para una Minería Sostenible, 2019.

Según datos entregados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin)⁴, Chile cuenta con 751 depósitos de relaves, los que pueden ser divididos en depósitos activos (aquellos que aún pueden cumplir con su vida útil y se encuentran en operación), inactivos y abandonados (cumplieron su vida útil, pero no tiene un plan de cierre de acuerdo con la ley y regulación). De estos, sólo el 15% corresponde a depósitos activos, el 62% a depósitos inactivos y un 23% a depósitos abandonados. Además, el volumen actual acumulado de relave activo se estima en 8.500 millones de metros cúbicos, mientras que el volumen aprobado, aumenta hasta 16.900 millones de metros cúbicos. Más aún, Ramírez et al., (2019) estiman en alrededor de 915.4 millones de toneladas secas de relave para el año 2026.

⁴ <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>

Todos estos antecedentes abalan la necesidad de buscar formas de revalorizar los relaves de cobre en la industria minera chilena y el resto del mundo. Es por esto que durante los últimos años han aparecido numerosos estudios relacionados a su reutilización. Uno de ellos es su uso en forma de aditivo al cemento, que podría incrementar su resistencia y elasticidad, a la vez que mejora su desempeño (Zhang et al., 2014).

Uno de los puntos importantes al momento de discutir sobre el relave de cobre es su toxicidad, para ello se han realizado experimentos demostrando que los niveles de metales pesados resultan estar por debajo de los permitidos por el Código de Regulación de Estados Unidos (Onuaguluchi y Eren, 2012). Además de estudios de reemplazo de cobre por cemento, hay experimentos como el planteado por Thomas et al., (2013) donde se estudia reemplazos de áridos de hasta un 60% obteniéndose resultados aceptables en parámetros como resistencia y durabilidad. En otros estudios realizados por Esmaeili et al., (2020) y de Esmaelili & Aslani (2019), usando relave de cobre extraído de la mina de cobre Sungun, Irán, demuestran la factibilidad de reemplazos parciales de cementos de hasta un 30% por relaves en la fabricación de hormigones.

Más recientemente, en la investigación realizada por Cofré et al., (2022) se reemplazó con relave de cobre proveniente de Perú, el cemento y áridos de probetas de mortero en base a una dosificación rica en cemento, logrando resultados aceptables con resistencias mecánicas cercanas a las comerciales, lo que justifica profundizar el estudio para identificar la dependencia del origen del relave en su factibilidad de uso para el reemplazo en probetas de hormigón.

Con los antecedentes expuestos, este estudio tiene como finalidad evaluar el relave de cobre, facilitado por la Minera Valle Central (MVC), como reemplazo de cemento o árido en las dosificaciones de hormigón. Para esto, se realizan distintas dosificaciones, y mediante un análisis de sus propiedades mecánicas, se identifica el potencial uso de los productos finales y su sensibilidad al porcentaje de reemplazo como al tipo origen del relave. De esta manera, se espera contribuir en la búsqueda de formas que revaloricen el relave de cobre, estimando su uso como material de construcción en algún formato más comercial, como, por ejemplo, en la fabricación de adoquines.

Según lo anterior, se tiene como objetivo evaluar el uso del relave de cobre en distintas dosificaciones de hormigón, ya sea aplicando un reemplazo parcial en cemento o áridos. Además, se estima la factibilidad de este reemplazo mediante experimentos de laboratorio que permiten caracterizar la resistencia mecánica que alcanzan las diferentes dosificaciones. Estos resultados son comparados con la investigación hecha por Cofré et al., (2022), profundizando en el posible uso del relave de cobre como material de construcción.

2 METODOLOGÍA

Para conocer las resistencias del hormigón en probetas de mortero, es necesario el desarrollo de dosificaciones de cemento, áridos y aguas adecuadas que maximicen sus propiedades mecánicas las que son modificadas a partir de reemplazos parciales de cemento o árido por relaves de cobre. Los ensayos son realizados bajo la norma chilena NCh158 Of 1967 “Cementos – Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento”, y las dosificaciones estarán basadas en el Manual del Mortero (Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón (ICH), 1989) y serán ensayadas a los 7, 14 y 28 días después de comenzado el proceso de curado, aplicándose el mismo procedimiento para todos los experimentos realizados durante la investigación.

Los materiales utilizados deben ser de plantas certificadas que cumplan con la normativa vigente NCh 148 Of 1968 “cementos – terminología y especificaciones generales” y NCh 163 Of 2013 “áridos para mortero y hormigones – requisitos”. Los elementos con los que se trabajará corresponden a los siguientes: cemento Portland siderúrgico de la empresa CBB ($\rho=3,00$ g/ml entregado por el proveedor), arena fina de Arenas Costanera Biobío ($\rho=2,66$ g/ml entregado por proveedor) y agua de grifo ($\rho=1,00$ g/ml). Los relaves de cobre utilizados en los experimentos son proporcionados por la empresa MVC y corresponden a los generados en una de sus operaciones en Chile. El material provisto se encontraba seco y con su densidad correspondiente ($\rho=3,20$ g/ml), es importante mencionar que solo fue proporcionada la densidad y que otras características como la composición o metales presentes no fueron entregadas por motivos de privacidad.

Para la realización de la investigación, se dividió en dos partes, la primera sección corresponde al denominado “Experimento A”, en el que son comparados las resistencias mecánicas obtenidas por E. Cofre (2022) con los resultados según mismas cantidades de materiales y dosificación, pero confeccionadas con un relave obtenido

desde la Minera Valle Central. Mientras, el resto de la investigación es centrada en la comparación de las propiedades mecánicas entre nuevas dosificaciones usando el relave de la minera MVC, este experimento es nombrado como “Experimento B”.

Las dosificaciones y nomenclatura del experimento A serán las mismas presentadas por Cofré et al., (2022), esto con el fin de comparar los resultados de dosificaciones idénticas pero relaves de orígenes diferentes, mientras que, para el experimento B se utilizarán 2 dosificaciones de las que un porcentaje de cemento o árido serán reemplazadas por relave de cobre además de una probeta de control para cada dosificación, la que no contiene ningún tipo de reemplazo que será utilizada como muestra patrón de comparación.

La programación del experimento considera los días de fabricación y fraguado de las probetas evitando días festivos según el calendario chileno o los días en los cuales el laboratorio facilitado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC) no se encuentre cerrado, de esta forma es posible la creación de una línea de trabajo sin interrupciones y eficaz, tanto para la toma de ensayos como para la fabricación. La planificación de los experimentos se encuentra en el **Anexo A, Tabla A.1 y Tabla A.2**.

2.1 Definición de dosificación

La dosificación del Experimento A corresponde a la propuesta realizada por Cofré et al., (2022) igual a 1:5. El trabajo realizado Cofré et al., (2022) se basó en la investigación hecha por Valenzuela (2018), donde se sugiere que la incorporación de relave de cobre en cantidades menores a un 5% del cemento en las mezclas de hormigón, no representa cambios importantes en el comportamiento mecánico.

Por otro lado, las dosificaciones del Experimento B serán creadas a partir del Manual del Mortero (ICH, 1968) para obtener mezclas del tipo 1:2 y 1:4. Para el caso del agua, esta tendrá una relación agua/cemento igual a 0,51 para ambas dosificaciones.

La cantidad de reemplazo de cemento por relave de cobre es son iguales a 10 y 30%, mientras que las probetas para reemplazar el árido serán de 30 y 50%, estos porcentajes son los mismo usados por Cofré et al., (2022), los que son usados en ambos experimentos obteniendo una forma de comparación entre ambos y la tesis de Cofré et al., (2022).

La nomenclatura utilizada para los experimentos es la siguiente:

- CP/RC/RA: Mortero sin reemplazo, Mortero con reemplazo de cemento, Mortero con reemplazo de áridos
- 10/30/50: Porcentaje correspondiente a la cantidad de reemplazo de cemento o árido.
- C1: Tipo de Relave de cobre utilizado para reemplazar.
- 1:2,1:4: tipo de dosificación usada en el experimento B para diferenciar probetas entre ellas.

Como las probetas se fabricaron con un solo tipo de relave, el relave C1 es el mismo utilizado tanto en el experimento A como en el experimento B. A modo de ejemplo, para una probeta del experimento B con reemplazo del 30% de relave de cobre por cemento y una dosificación de 1:2, sería la siguiente: RC30C1 1:2.

2.2 Fabricación de probetas

Para el proceso de fabricación se utilizaron instrumentos certificados y calibrados facilitados por el Departamento de Ingeniería Civil de la UCSC, las cantidades de los distintos materiales utilizados en el Experimento A son presentadas en la **Tabla 1** que fue extraída desde la tesis de Cofré et al., (2021) como también el volumen extra utilizado durante el proceso de fabricación a modo de evitar la contaminación cruzada y falta de mezcla durante el proceso de llenado de probetas.

Tabla 1: Dosificación del Experimento A, (Cofré et al., 2022)

Probeta	Cemento [kg]	Arena [kg]	Agua [L]	Relave [kg]	Volumen Adicional [%]	Probetas por muestra
CP	1,974	5,168	0,658	0	50	9
RC10C1	1,778	5,168	0,658	0,218	50	9
RC30C1	0,691	5,168	0,658	0,656	50	9
RA30C1	1,844	3,376	1,536	3,060	40	9
RA50C1	1,138	1,490	1,138	3,150	40	9

Por otro lado, las cantidades para el experimento B son mostradas en la **Tabla 2** y **Tabla 3** para las dosificaciones de 1:2 y 1:4 respectivamente. Algunas cantidades de agua agregadas durante el proceso de mezclado superaron la relación agua/cemento 0,51 para hacer que las mezclas fueran más trabajables ya que debido a la gran cantidad de árido fino que aporta el relave, ésta no conseguía tener la consistencia deseada para trabajar y lograr el proceso de llenado de probetas, dichos valores para la muestra RA50C1 1:2 es de 0,67, para RA30C1 1:4 igual a 0,98 y para RA50C1 1:4 es de 0,55.

Tabla 2: Dosificación del experimento B igual a 1:2

Probeta	Cemento [kg]	Arena [kg]	Agua [L]	Relave [kg]	Volumen Adicional [%]	Probetas por muestra
CP 1:2	1,874	3,656	0,956	0	30	9
RC10C1 1:2	1,687	3,656	0,956	0,200	30	9
RC30C1 1:2	1,312	3,656	0,956	0,600	30	9
RA30C1 1:2	1,874	2,559	0,956	1,320	30	9
RA50C1 1:2	1,874	1,828	1,256	2,199	30	9

Tabla 3: Pesos para la dosificación del experimento B igual a 1:4.

Probeta	Cemento [kg]	Arena [kg]	Agua [L]	Relave [kg]	Volumen Adicional [%]	Probetas por muestra
CP 1:4	1,107	4,320	0,565	0	30	9
RC10C1 1:4	0,996	4,320	0,565	0,118	30	9
RC30C1 1:4	0,775	4,320	0,565	0,354	30	9
RA30C1 1:4	1,107	3,024	0,869	1,559	30	9
RA50C1 1:4	1,107	2,160	1,090	2,598	30	9

Conocidas las cantidades de material a utilizar para la fabricación, cada elemento es pesado y depositado en un bowl, obteniendo un resultado como el de la **Figura 2**, que muestra la superficie del recipiente con cemento y relave de cobre.



Figura 2: Cemento y relave de cobre antes de mezclar.

Fuente: Factibilidad de uso de relaves de cobre en dosificaciones de morteros de hormigón; mediante análisis de ensayos a flexión y compresión. E. Cofre (2022).

Los elementos para cada dosificación durante el estudio son combinados por una mezcladora de accionamiento eléctrico como es mencionado en la norma NCh 158 Of 1967, de marca Controls, modelo 65 – L0005, que puede observarse en la **Figura 3**, el proceso de la mezcla para los distintos elementos es el siguiente:

- 1 minuto a velocidad baja (140 ± 5 r.p.m).
- 30 segundos a velocidad alta (285 ± 10 r.p.m).
- Reposar durante 1:30 minutos aprovechando de despegar el material adherido al bowl.
- 1 minuto a velocidad alta (285 ± 10 r.p.m).



Figura 3: Mezcladora marca Controls, modelo 65 – L0005.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que la mezcla obtenga la consistencia deseada, es depositada en recipientes rílem, como se muestra en la **Figura 4**, dichos moldes se dividen en 3 secciones y como resultado se obtienen probetas con las siguientes dimensiones: Longitud: 160 [mm], Ancho: 40 [mm] y Altura: 40 [mm] las que pueden visualizarse en la **Figura 5** El proceso de llenado de las probetas es echo por capas, cada capa de mezcla es apisonada con un elemento plano, de esta forma se evitan cúmulos de aire dentro de ellas, luego es surcada la cara de la capa para obtener una mejor cohesión con la siguiente, este proceso se hace hasta llenar la probeta para luego terminar enrasando por la superficie del recipiente, de esta forma es eliminado el excedente del compuesto.



Figura 4: Moldes rilem con mezcla.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 5: Probetas desmoldadas después de fraguado.
Fuente: Elaboración propia.

2.3 Curado de probetas

Después de que las mezclas se encuentran depositadas en los moldes rilem, se comienza con el proceso de secado, este proceso dura al menos 24 horas y puede extenderse a un total de 48 horas como se menciona en la norma Nch 158 Of 1967, para las probetas de reemplazo de 10% solo fue necesario un secado de 24 horas, pero las probetas de 30% y 50% de reemplazo de relave por árido, tanto para las de tipo RC y RA fue necesario un secado de 48 horas, esto debido a la alta cantidad de áridos finos y agua en ellas, así se asegura que las probetas no presenten fracturas al momento de desmoldar o pulverizaciones.

Una vez desmoldadas las probetas, estas comienzan el proceso de curado en cubetas plásticas de 35 x 40 x 500 mm con agua y termo calefactores metálicos de 200 W, estas cubetas fueron dispuestas en ubicaciones dentro del laboratorio de forma tal, que no pudieran ser golpeadas accidentalmente. Las probetas son totalmente sumergidas en agua de forma vertical para luego sellar el recipiente con una temperatura de 23 ± 2 °C **Figura 6.**



Figura 6: Cubeta para curado de probetas, contiene las probetas, agua y un termo calefactor.
Fuente: Elaboración propia.

2.4 Toma de ensayos

Una vez pasados los 7, 14 y 28 días desde que comenzó el proceso de curado, se pueden conocer las propiedades mecánicas de las probetas, con ensayos de flexión y compresión que fueron realizados tanto en el experimento A como en el experimento B. siguiendo la norma Nch 158 Of 1967. La máquina encargada de realizar los ensayos para ambos experimentos es una prensa de compresión Pilot 3, marca Controls, modelo 65-L11G2/C de la que se obtienen resultados en [Ton] y $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ para flexión y compresión, la prensa utilizada puede apreciarse en la **Figura 7.**



Figura 7: Prensa de compresión Pilot 3, marca Controls, modelo 65 – L11G2/C.
Fuente: Elaboración propia.

Como se indicó previamente, los ensayos fueron efectuados siguiendo la norma NCh 158 Of 1967, para pruebas de flexión. La probeta es pesada en una balanza digital y ubicada en los apoyos de máquina de flexión de forma equidistante entre ellos, la carga que es aplicada a través del rodillo superior a una velocidad de 5 ± 1 kg/s, debe cortar lo más cercano posible a la mitad de la probeta, es decir, a 80 mm desde alguna cara lateral de ésta, como se muestra en la **Figura 8**.



Figura 8: Probeta dispuesta para ensayo de flexión.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez finalizado el ensayo a flexión y con la probeta ya dividida en dos, se pesan ambas partes nuevamente en la balanza, se miden las 4 aristas para obtener un promedio de la altura de la probeta e inmediatamente es ubicada en la placa de la máquina de compresión, dichas placas presentan dimensiones de 40 x 40 mm con un área de 1600 mm² que comprimirán la probeta en dos caras laterales a una velocidad de carga que genere aumentos entre 10 y 20 [Kg/cm²/s] hasta finalizar cada ensayo con la fractura de la probeta. En la **Figura 9** se puede observar la disposición de la probeta junto con las placas que la comprimirán en la máquina de compresión.



Figura 9: Probeta dispuesta para ensayo de compresión.
Fuente: Elaboración propia.

3 RESULTADOS

3.1 Experimento A

Para Experimento A, se analizan los resultados promedio de cada ensayo, con el fin de conseguir una mejor compresión del experimento y sus resultados. La información completa de los ensayos realizados durante el Experimento A, se encuentran en el **Anexo B, Figura B.1 y Figura B.2.**

3.1.1 Peso probetas

Las probetas con reemplazo de cemento creadas para el experimento A, obtuvieron ganancias de peso de 5 a 9% mientras que las probetas creadas a partir del reemplazo de arena solo obtuvieron ganancias de 2 a 4% como se muestra en la **Tabla 4.**

Tabla 4: Pesos promedio antes y después de curar de las distintas probetas.

Probeta	Promedio Pesos [gr]		Aumento de Peso	
	Inicial	Final	gr.	%
CP	498	546	48	8,8
RC10C1	498	548	49	9,0
RC30C1	510	537	27	5,0
RA30C1	562	577	15	2,6
RA50C1	555	574	20	3,4

3.1.2 Resultados ensayos flexión y compresión

Los resultados para los ensayos a flexión y compresión se muestran en la **Figura 10 y Figura 11** respectivamente, se observa que durante el ensayo de flexión las probetas con reemplazo de arena comienzan con una resistencia menor a la muestra CP, pero logran superarla a los 28 días después de comenzado el experimento. Por otro lado, las probetas que poseen reemplazo de cemento solo logran asemejar la resistencia de la muestra CP, además, de no obtener resultados representativos para la muestra RC30C1 debido a la baja resistencia presentada durante las primeras etapas de los ensayos.

En el ensayo de compresión se aprecia la tendencia de las muestras con reemplazo de arena de superar al término del experimento a la muestra CP, como sucedió en los ensayos de flexión, además, es posible obtener

datos para las muestras de tipo RC30C1, las que no logran asimilar la resistencia de la muestra CP, pero demuestran que de igual forma obtienen una ganancia de resistencia durante el experimento.

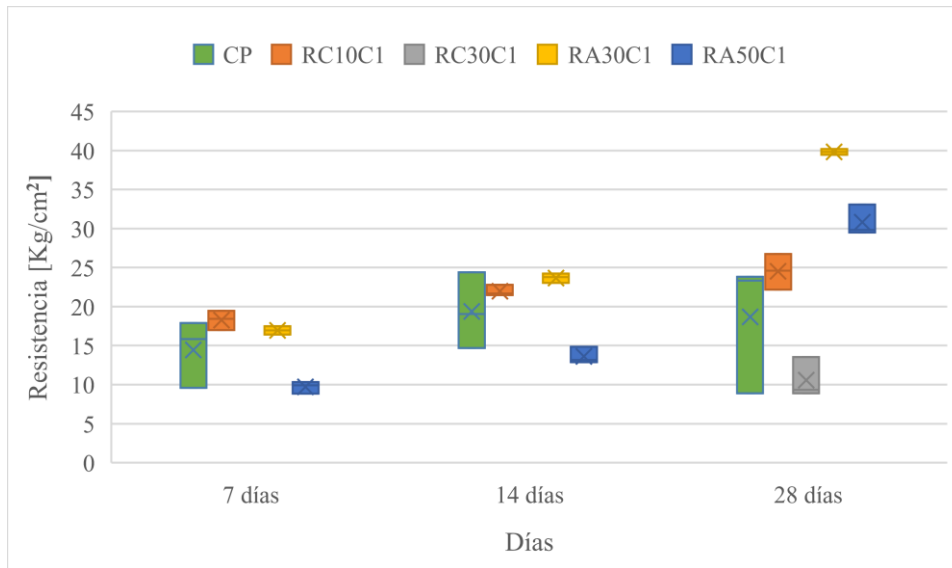


Figura 10: Resultados ensayo de flexión, Experimento A.
Fuente: Elaboración propia.

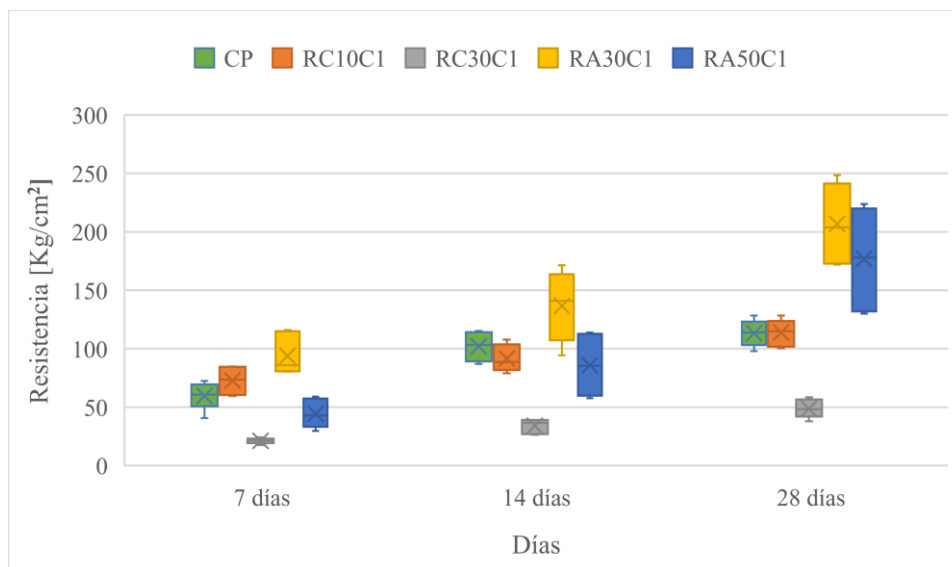


Figura 11: Resultados ensayo a Compresión, Experimento A.
Fuente: Elaboración propia.

La variación de datos más notoria ocurre en los ensayos de compresión en donde la resistencia mínima para una muestra de RA50C1 es de 129,96 [kg/cm²] y la máxima de 223,72 [kg/cm²], la diferencia entre las distintas muestras es de 93,76 [kg/cm²] al término del experimento, además, para la muestra RA30C1 la diferencia alcanza un valor de 75,63 [kg/cm²].

Las curvas de resistencia para los ensayos de flexión y compresión son exhibidas en la **Figura 12** y **Figura 13**. En este tipo de gráficos se hace más notoria la resistencia que ganan las distintas muestras durante el proceso de curado hasta el término del experimento, además como el crecimiento de la muestra RA50C1 comienza a ganar mucha más resistencia a partir de la segunda semana. De igual forma la resistencia a

compresión de las muestras con reemplazo de arena, muestran un crecimiento más lineal que las muestras del tipo de reemplazo de cemento.

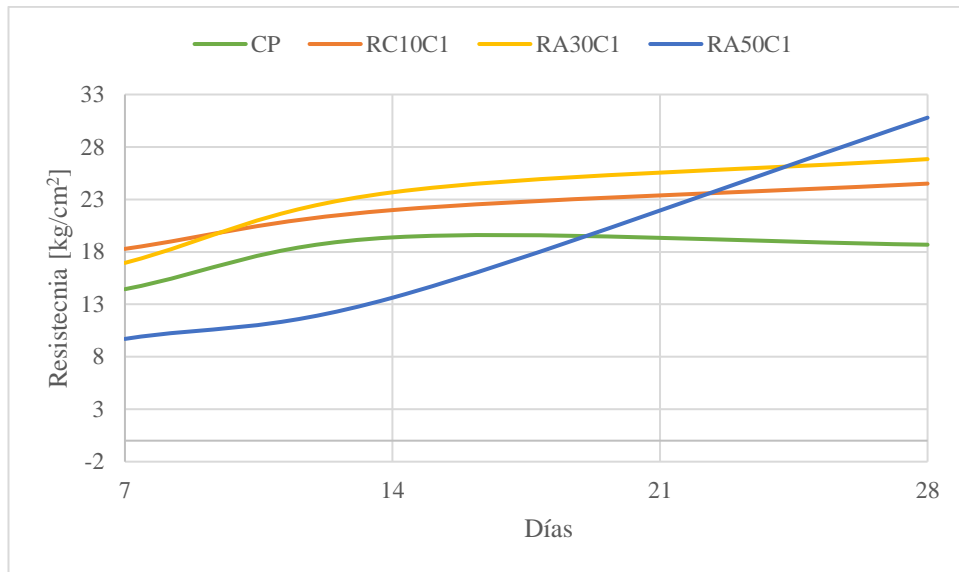


Figura 12: Curva de resistencia a flexión, Experimento A.
Fuente: Elaboración propia.

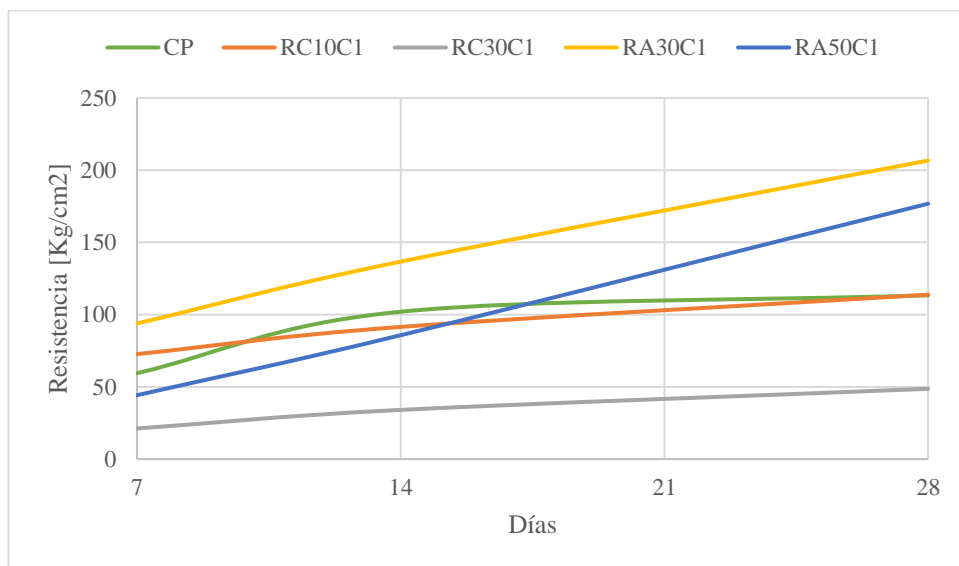


Figura 13: Curva de resistencia a compresión, Experimento A.
Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 6** se presentan los resultados ponderados para las resistencias a compresión junto con la desviación de cada una.

Tabla 6: Resultados ensayo a compresión experimento A

Probetas	7 días		14 días		28 días	
	Presión [kg/cm ²]	Desviación estándar	Presión [kg/cm ²]	Desviación estándar	Presión [kg/cm ²]	Desviación estándar
CP	59,50	11,43	102,05	11,68	113,39	11,12
RC10C1	72,72	11,76	91,52	11,70	113,84	11,14
RC30C1	21,21	2,33	34,07	5,81	48,69	7,66
RA30C1	93,93	16,86	136,73	30,60	206,72	36,64
RA50C1	44,26	11,74	85,79	28,23	176,83	47,71

3.2 Experimento B

Para Experimento B, se analizan los resultados promedio de cada set de ensayos, con el fin de conseguir una mejor compresión del experimento y sus resultados. La información completa de los ensayos realizados durante el experimento B, se encuentran en el **Anexo B, Figura B.3, Figura B.4, Figura B.5 y Figura B.6.**

3.2.1 Peso probetas

En la **Tabla 7**, se aprecia el promedio de los pesos iniciales junto con el promedio de sus pesos finales, además, la ganancia en [gr] y [%] para las dosificaciones de 1:2 y 1:4, donde la dosificación 1:2 es la que presenta menos obtención de peso después de 28 días de curado.

Tabla 7: Pesos promedio antes y después de curado

Probeta	Dosificación 1:2				Dosificación 1:4			
	Promedio Pesos [gr]		Aumento de Peso		Promedio Pesos [gr]		Aumento de Peso	
	Inicial	Final	gr	%	Inicial	Final	gr	%
CP	554	563	9,8	1,7	539	554	14,4	2,6
RC10C1	551	558	6,8	1,2	527	546	18,8	3,4
RC30C1	552	557	5,9	1,1	541	551	10,3	1,9
RA30C1	558	569	10,4	1,8	568	578	9,9	1,7
RA50C1	530	543	13,2	2,4	543	555	12,1	2,2

3.2.2 Resultados ensayos a flexión y compresión

Los resultados de ensayos a flexión y compresión son mostrados en la **Figura 14, Figura 15, Figura 16 y Figura 17.** Donde el primer par de figuras corresponde a las dosificaciones 1:2, mientras que el último par son de la dosificación 1:4.

Se puede observar, como en la **Figura 14 y Figura 16** correspondientes a los ensayos de flexión para ambas dosificaciones, los datos no presentan una gran variación, mientras que en la **Figura 17 y Figura 19** la variación de los datos es mínima a pesar de las cantidades de datos.

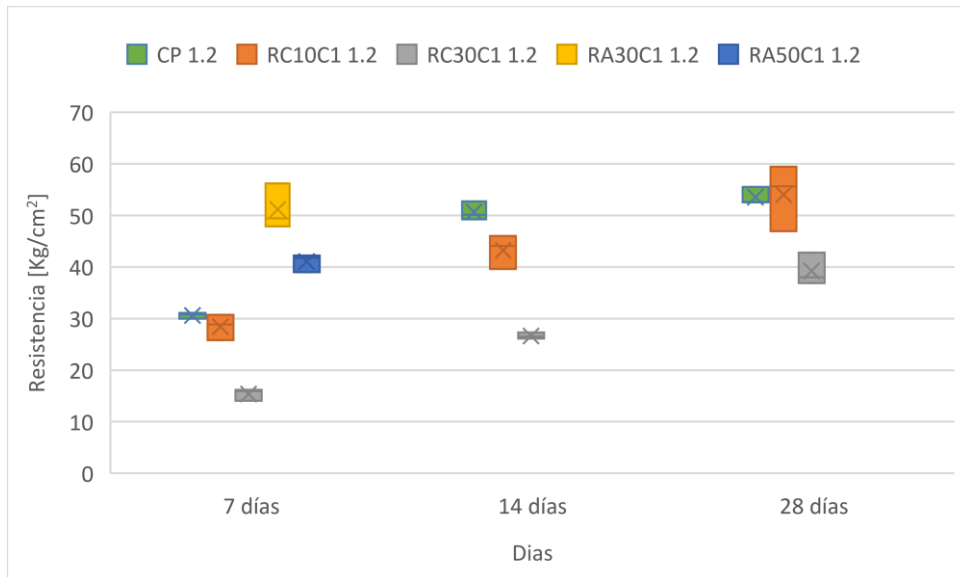


Figura 14: Resultados ensayo a flexión dosificación 1:2.
Fuente: Elaboración propia.

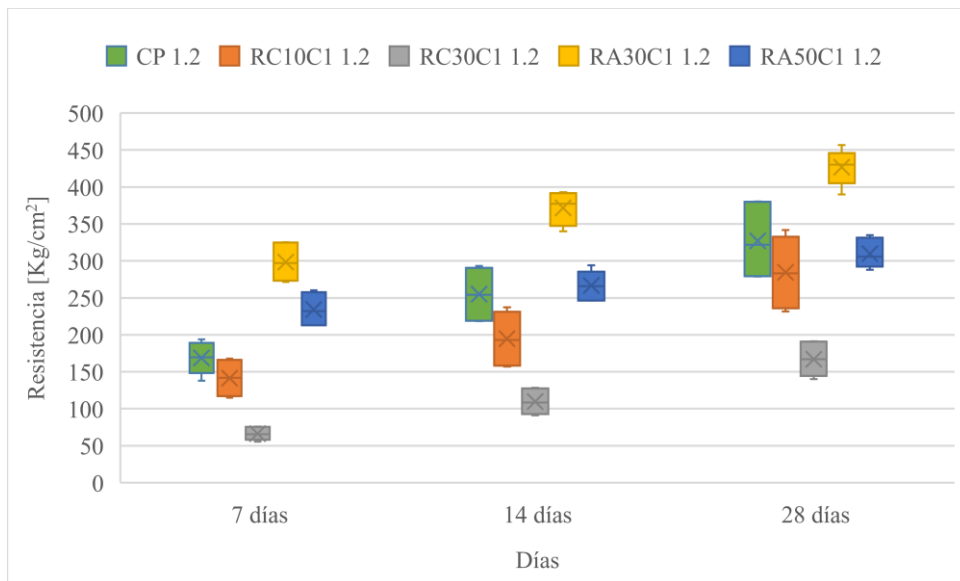


Figura 15: Resultados ensayo a compresión dosificación 1:2.
Fuente: Elaboración propia.

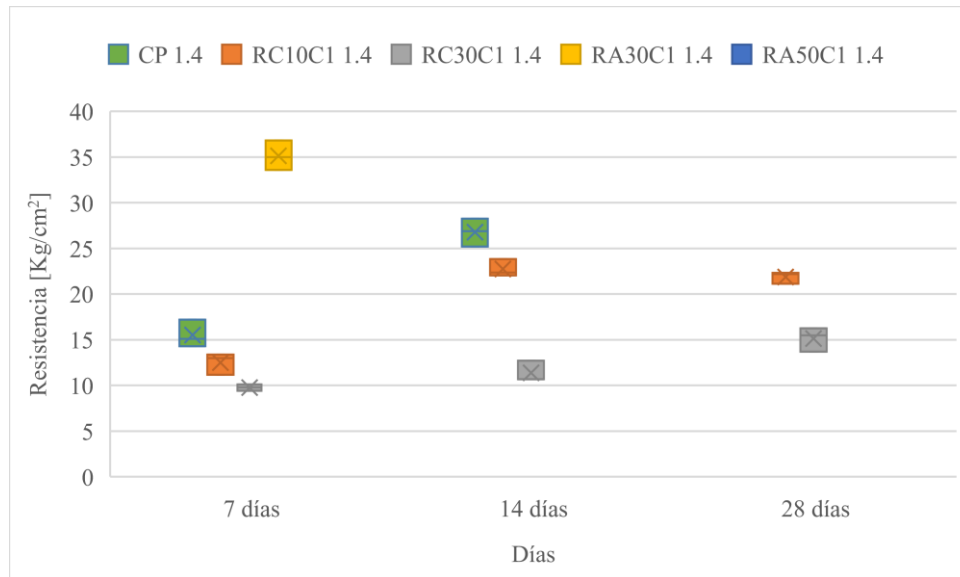


Figura 16: Resultados ensayo a flexión dosificación 1:4.

Fuente: Elaboración propia.

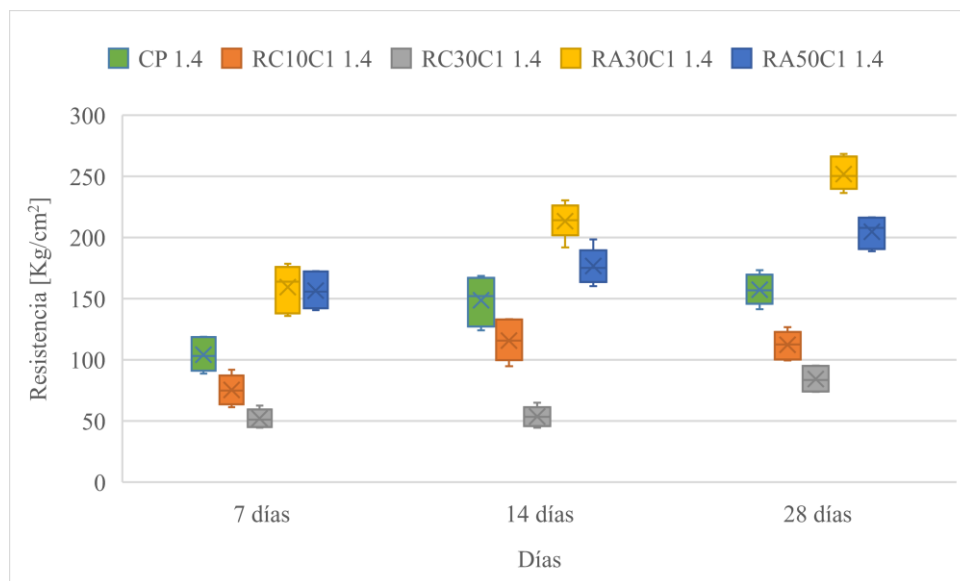


Figura 17: Resultados ensayo a compresión dosificación 1:4.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, las curvas de resistencia presentadas en la **Figura 18** y **Figura 19** corresponden solo a los ensayos de compresión de ambas dosificaciones. Se puede observar que para la dosificación 1:2, las curvas con reemplazos de cemento mantienen un crecimiento por debajo de la muestra CP, mientras que las muestras del tipo reemplazo de arena, tienen un comienzo y crecimiento mayor a la muestra de control CP, este comportamiento es más notorio en las curvas para las dosificaciones 1:4, donde la muestra RA30C1, logra superar en todo el experimento a la muestra de control.

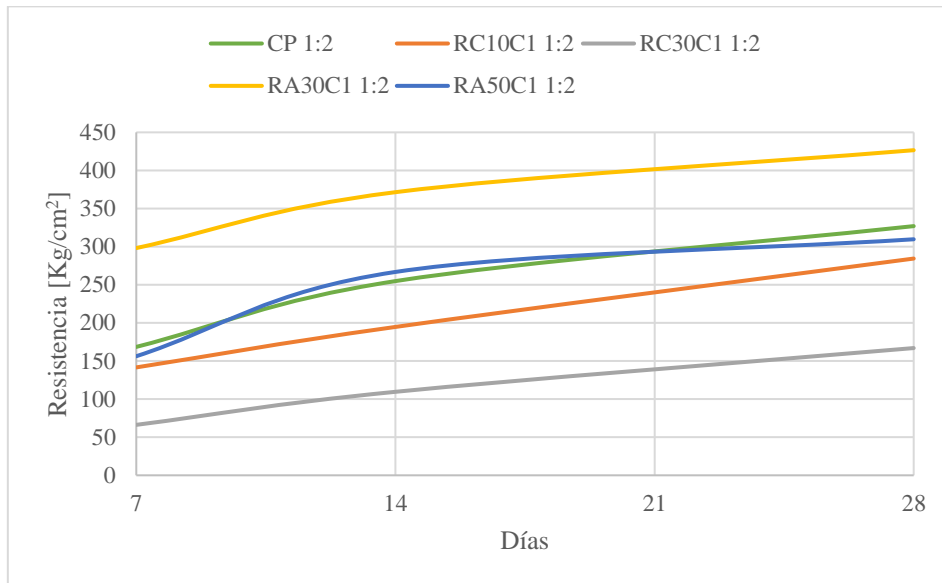


Figura 18: Curva de resistencia, ensayo a compresión, dosificación 1:2.
Fuente: Elaboración propia.

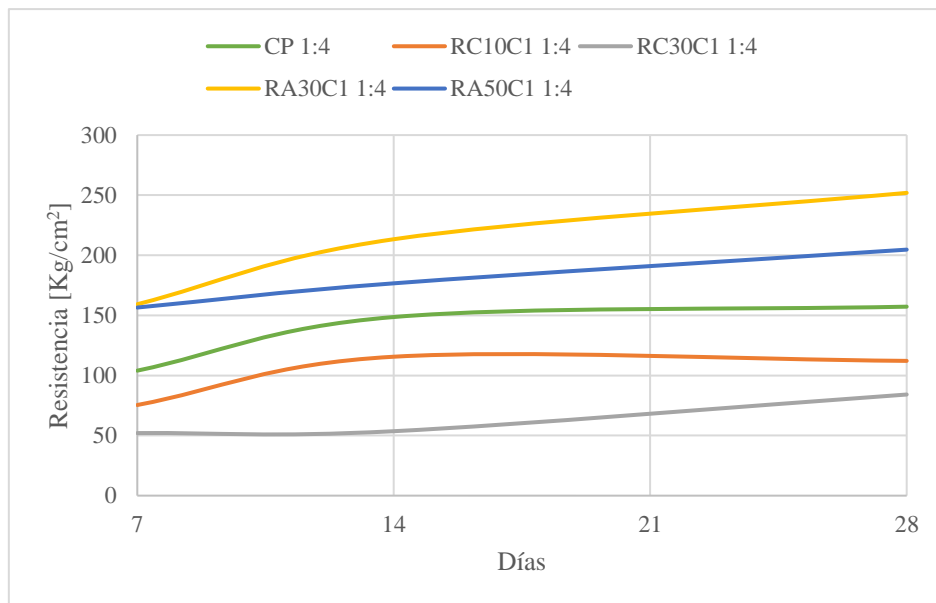


Figura 19: Curva de resistencia, ensayo de compresión, dosificación 1:4.
Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 8** y **Tabla 9**, son observados los datos obtenidos mediante una media de los distintos resultados y la desviación correspondiente, se puede observar que para la dosificación 1:2 mostrada en la tabla 8, la resistencia mínima es de 166,97 [kg/cm²] para la muestra del tipo RC30C1, mientras que la resistencia máxima, superando a la muestra de control es de 426,57 [kg/cm²] correspondiente a la de tipo RA30C1. Sobre la desviación de los datos con variaciones altas, se atribuyen al proceso de confección de las probetas, debido a la falta de experiencia.

Para la dosificación 1:4 la resistencia mínima corresponde a 84,14 [kg/cm²] relacionada a la muestra RC30C1, mientras que la resistencia máxima es de 251,91 [kg/cm²] vinculada con la muestra del tipo RA30C1, además la muestra de control tiene una resistencia al final del experimento igual a 157,23 [kg/cm²]. Respecto a la variación de los datos, los resultados de la desviación estándar son en su mayoría, menor a la media, haciendo que los ensayos presenten un mejor grado de confianza al momento de analizar.

Tabla 8: Resultados ponderados ensayo de compresión para dosificación 1:2

Probeta	7 días		14 días		28 días	
	Presión [kg/cm ²]	Desviación estándar	Presión [kg/cm ²]	Desviación estándar	Presión [Kg/cm ²]	Desviación estándar
CP 1.2	168,51	22,04	254,81	39,04	326,95	52,23
RC10C1 1.2	141,57	26,87	194,70	39,58	284,40	53,13
RC30C1 1.2	66,23	9,15	109,54	17,58	166,97	25,07
RA30C1 1.2	298,17	26,94	371,49	23,28	426,57	24,04
RA50C1 1.2	156,24	24,45	266,81	20,07	309,70	19,45

Tabla 9: Resultados ponderados ensayo a compresión para dosificación 1:4

Probeta	7 días		14 días		28 días	
	Presión [kg/cm ²]	Desviación estándar	Presión [kg/cm ²]	Desviación estándar	Presión [kg/cm ²]	Desviación estándar
CP 1:4	104,00	13,19	148,63	19,92	157,23	13,56
RC10C1 1:4	75,42	12,13	115,60	17,88	112,14	12,12
RC30C1 1:4	52,06	7,24	53,63	8,30	84,14	11,17
RA30C1 1:4	159,27	19,41	213,33	14,65	251,91	14,12
RA50C1 1:4	156,52	15,60	176,65	15,12	204,68	12,70

4 DISCUSIÓN

El siguiente apartado será dividido en los experimentos A y B para un mejor entendimiento de cada uno

4.1 Experimento A

Comenzando por el peso de las probetas según la **Tabla 4** la muestra de control CP obtuvo una ganancia de peso igual al 8.8%, valor que se fue reduciendo después de agregar un 30% de relave de cobre reemplazando tanto el cemento como el árido, obteniendo un valor mínimo en las probetas del tipo RA30 que obtuvo una ganancia igual al 2.6% sobre el peso inicial, este tipo de muestras con reemplazo de arena por relave de cobre tienen la particularidad que la cantidad de árido es sustituida por un material más fino, haciendo que la mezcla sea en su mayoría partículas finas reduciendo la cantidad de vacíos en la mezcla, por esta misma razón, es que la permeabilidad se ve reducida y a su vez la cantidad de peso que puedan ganar durante el proceso de curado.

En la **Tabla 9** es posible apreciar los resultados obtenidos en la tesis de Cofré et al., (2022) nombradas como M1, comparados con los resultados obtenidos durante el experimento A, casilla nombrada como C1, si bien, las resistencias durante los ensayos de compresión son menores a las obtenidas durante la tesis de Cofré et al., (2022), sobre todo en las muestras de control CP, el resto de las resistencias durante el experimento A se ven aumentadas, la poca resistencia de las probetas se puede deber a fallas durante el proceso de fabricación debido a la falta de experiencia al momento de confeccionarlas.

Además, en comparación con el experimento B, las muestras con reemplazo de cemento poseen mayor resistencia, pero las probetas con reemplazo de arena obtienen una disminución en su capacidad mecánica de compresión.

Tabla 9: Comparación de ensayos a compresión entre resultados de Cofré et al., (2022) y Experimento A

Probeta	7 días		14 días		28 días	
	M1 [kg/cm ²]	C1 [kg/cm ²]	M1 [kg/cm ²]	C1 [kg/cm ²]	M1 [kg/cm ²]	C1 [kg/cm ²]
CP.2909	185,84	59,50	218,68	102,05	417,21	113,39
RC10	265,98	72,72	255,5	91,52	314,49	113,84
RC30	122,86	21,21	168,25	34,07	159,78	48,69
RA30	138,91	93,93	227,99	136,73	300,51	206,72
RA50	112,27	44,26	145,98	85,79	199,93	176,83

Si bien las muestras del tipo RC no muestran grandes mejoras en comparación con la muestra de control CP, sigue siendo factible un reemplazo de 10% en la dosificación, ya que, la resistencia no presenta diferencias notables y por lo que sería de ayuda para la reutilización del relave.

En términos del tipo del relave, el usado por Cofré et al., (2022) durante el desarrollo de la tesis muestra irregularidades en algunos tipos de muestras, por ejemplo, en la muestra RC10 y RC30 que tienen una disminución de la resistencia entre los ensayos, mientras que el relave usado para el experimento A tiene un comportamiento capaz de crecer durante el desarrollo de la investigación sin perder resistencia entre los días de ensayos entregando una mayor confiabilidad al momento de usar el relave del experimento A. La información sobre los distintos procesos a los que fue expuesto el relave durante la obtención o refinación del material son resguardadas por la minera que facilito el relave.

4.2 Experimento B

Las probetas de la dosificación 1:2 en promedio obtuvieron una ganancia de 1,6% lo que es un 0,1% mas que la probeta de control CP, siendo la probeta RC30C1 la que menos peso obtuvo después de los 28 días de curado. Por otro lado, la dosificación 1:4 en promedio gano un 2,3% de peso siendo un 0,3% menos que la probeta control, donde la probeta RA30C1 es la que menos obtuvo un aumento de peso con un 1,7% sobre el inicial. La cantidad de fino en las probetas debido al uso de relave y la poca cantidad de áridos, hace que nuevamente se vea disminuida la permeabilidad del producto reflejándose en el poco peso adicionado a las probetas al final del experimento.

El comportamiento de las distintas probetas en relación con el peso que obtuvieron al final de la prueba puede ser irregular en algunas probetas, lo que se deriva del proceso de fabricación de ellas, específicamente, durante el proceso de compactación. Por ejemplo, en las probetas del tipo RA al ser una mezcla más plástica por la alta cantidad de finos, conlleva a que la mezcla se adhiera al instrumento en cada movimiento y se dificulta su homogenización.

Durante los ensayos de flexión la prensa presentó problemas, por lo que los resultados más confiables son los presentados a los 7 días de comenzado el experimento. En la **Figura 15** que corresponde a la dosificación 1:2, se observa como la probeta de control CP comienza con una resistencia promedio de 30,62 [kg/cm²] y como las mezclas del tipo RA comienzan por sobre la probeta control con un promedio de 51,15 [kg/cm²] para un 30% de reemplazo y 41,01 [kg/cm²] para las probetas del tipo RA50C1, mientras que las de tipo RC comienzan por debajo de CP y la que logran superar gracias a la muestra RC10C1 al final del ensayo con una resistencia de 54,01 [kg/cm²]

Respecto a los ensayos de flexión de la dosificación 1:4 se puede observar por la **Figura 17** que a los 7 días la muestra del tipo RA30C1 tiene una resistencia promedio de 35,12 [kg/cm²] comenzando sobre la probeta CP que alcanza una resistencia de 15,45 [kg/cm²], por otro lado, las muestras del tipo RC comienzan con una resistencia menor a la muestra de control, aunque logren aumentar su resistencia al final del ensayo, éstas no lograron superarla para el final del experimento.

Los ensayos de compresión resultan ser mucho más confiables para realizar comparaciones, debido a que se presentan datos de todas las probetas hasta el final del experimento. Para la dosificación 1:2 es posible observar como las mezclas del tipo RC comienzan por debajo de la muestra de control manteniendo la tendencia de nunca poder superarla. En cambio, las muestras del tipo RA, tiene una buena tendencia a mejorar la resistencia durante el transcurso de la prueba, la notoriedad de la muestra RA30C1 de estar siempre por encima la muestra

CP durante todo el experimento y la muestra RA50C1, aunque comienza por debajo del control es capaz de mantener un crecimiento tal de llegar a superarla al final del ensayo.

Por otro lado, la dosificación 1:4 presenta resultados interesantes al momento de comparar las curvas, nuevamente las muestras RC están por debajo del control durante todo el experimento, en cambio las muestras RA50C1 presenta un comportamiento casi lineal y a diferencia de la dosificación 1:2 siempre se encuentra por encima del control, a su vez la muestra RA30C1 es la que mayor resistencia consiguió durante el experimento mostrando una dominación del ensayo de compresión en ambas dosificaciones.

Respecto a la comparación entre los distintos resultados mostrados en la **Figura 20**, se aprecia como las muestras del tipo RC presentadas por Cofré et al., (2022), tiene una mejor resistencia que las dosificaciones 1:2 y 1:4 durante todo el estudio, sin embargo, no es el caso de las muestras del tipo RA que no consiguieron superar las dosificaciones propuestas en el experimento, donde incluso, la resistencia máxima entre las 3 dosificaciones, es una probeta del tipo RA30C1 con una dosificación de 1:2.

4.3 Comparación de los resultados.

En la **Figura 20** es expuesto un gráfico comparativo entre los resultados de compresión obtenidos por Cofré et al., (2022), los resultados obtenidos durante el experimento A en base al nuevo relave y los resultados a compresión de las dosificaciones propuestas para el Experimento B correspondiente a las muestras del tipo RC10, RA30 y RA50.

La resistencia máxima es obtenida por la muestra del tipo RA30, dosificación 1:2, la que obtuvo un valor de 426,57 [kg/cm²], mientras que la resistencia mínima entre las 4 dosificaciones es de las muestras RC10, dosificación 1:4, que obtuvo una capacidad de resistencia igual a 112,14 [kg/cm²].

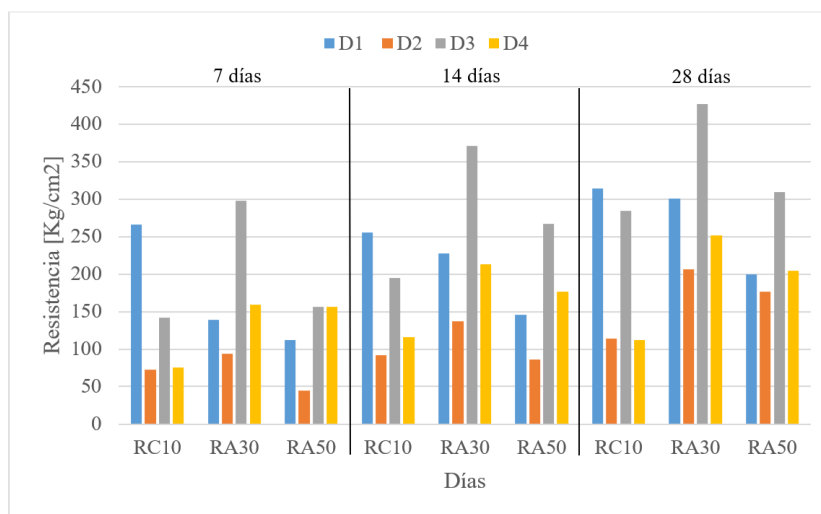


Figura 20: Comparación de resultados a compresión entre D1, D2, D3 y D4.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- D1: Dosificación aplicada por Cofré et al., (2022).
- D2: Dosificación experimento A con nuevo relave.
- D3: Dosificación 1:2.
- D4: Dosificación 1:4.

5 CONCLUSIONES

Por los resultados del Experimento A, si bien no llegan a los mismos niveles de resistencia mecánicas expuestos por Cofré et al., (2022) al usar el relave de cobre en los reemplazos de cemento, estas tuvieron un crecimiento lineal, con poca diferencia a la muestra de control. De lo anterior se refuerza la factibilidad de uso

del relave desde distintos yacimientos como un material a utilizar en mezclas de hormigón, pero cada relave debe tener su propia dosificación.

Durante el Experimento B, las mezclas con reemplazo de cemento por relave de cobre no lograron un buen desempeño en comparación con las muestras patrón, aunque sigue siendo óptimo para elementos de baja sollicitación ya que obtuvieron un comportamiento que se acerca a un hormigón H15 o incluso H25 para un 10% de reemplazo.

En ambas dosificaciones de reemplazo de árido propuestas durante el Experimento B, las muestras obtuvieron resultados destacables debido a la alta resistencia a compresión alcanzada a los 28 días. En especial, la mezcla RA30C1 1:2, que alcanzó valores de un hormigón H35 usados como elementos de alta sollicitación. En cambio, la dosificación 1:4 obtiene resultados comparables a un hormigón H20-H25 siendo posible su uso en elementos medianamente sollicitados.

Por otro lado, la poca ganancia de peso por parte de las probetas, demuestra una baja permeabilidad de las probetas. Esta característica de las muestras puede ser una característica diferenciadora para buscar usos alternativos de los hormigones con relave a partir de la creación de hormigones impermeables capaces de ser usados en estructuras donde se desea contener o conducir el agua.

Además, según la **Figura 20**, las dosificaciones propuestas por la investigación, en comparación de las creadas por E. Cofre (2022), las dosificaciones de áridos presentan mejores resultados en sus propiedades mecánicas, con una variabilidad de datos menor, por su parte, la dosificación usada por E. Cofre (2022), obtiene mejores resultados en las muestras con 10% de reemplazo de cemento por relave de cobre.

Con lo expuesto durante la investigación, las comparaciones realizadas con el estudio de Cofré et al., (2022), los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas durante el transcurso del experimento y las propiedades que indicarían su impermeabilidad, el relave de cobre puede ser capaz de obtener una revalorización al momento de ser usado como reemplazo parcial en mezclas cementicias, haciendo posible su uso en la construcción para estructuras de baja-mediana sollicitación y contribuyendo de paso a disminuir los depósitos de relaves en Chile producidos por la industria minera.

6 Recomendaciones y comentarios

Al momento de la fabricación de las probetas, es recomendable el uso de elementos que puedan ayudar a lograr una mejor compactación, de preferencia elementos que puedan llegar a las esquinas del molde, ya que, este proceso ayuda en gran medida al momento del desmolde de la probeta, evitando una disgregación de los bordes.

Para las mezclas con mucha cantidad de fino, fue necesario agregar mas cantidad de agua que la indicada por la dosificación, por este motivo, se sugiere el uso de aditivos que puedan reemplazar el exceso de agua, ayudando a plastificar la mezcla. Así, no se vera comprometida la perdida de resistencia por demasiada agua y a su vez, sería capaz de aumentar las propiedades mecánicas de las probetas.

Se recomienda además que al momento de trabajar con mezclas que posean mucha agua, como lo son las mixturas del tipo RA, se fragüen durante al menos 48 horas, de esta forma, es posible evitar romper la probeta al momento de su desmolde.

Se sugiere la creación de elementos estructurales con reemplazo de relave de cobre, como ladrillos o algún elemento decorativo como porcelanatos, creados a partir de moldes con impresiones 3D de baja sollicitación.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Claussen, P., Zúñiga, E., Díaz, B., Fernández, B.** (2019). División de Desarrollo Sostenible del Ministerio de Minería. Plan nacional de depósitos de relave para una minería sostenible, 21.
- Cofre, C.** (2022). Factibilidad de uso de relaves de cobre en dosificaciones de morteros de hormigón; mediante análisis de ensayos a flexión y compresión, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.
- Esmaeili, J., Aslani, H.** (2019). Use of copper mine tailing in concrete: Strength characteristics and durability performance. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(3), 129-741.
- Esmaeili, J., Aslani, H., Onuaguluchi, O.,** (2020). Reuse potentials of copper mine taulings in mortar and concrete composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5)
- Gutiérrez, I., Álvarez, A., Aracena, I., Rayo, J., Cornejo, J. y Vera, F.** (2020). Reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor D288-MAN-GN-P2-001. Manual de Uso Público 1 (2), 8-9.
- Instituto Nacional de Normalización.** (1967). Norma chilena 158, cementos – ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento.
- Instituto Nacional de Normalización.** (1968). Norma chilena 148, cementos – terminología y especificaciones generales.
- Instituto Nacional de Normalización.** (2013). Norma chilena 163, áridos para mortero y hormigones – requisitos.
- Onuaguluchi, O., Eren, Ö.** (2012). Cement mixture containig copper tailings as an additive: durability properties. *Materials Reserch*. 1029-1036.
- Onuaguluchi, O., Eren, Ö.** (2012). Copper tailings as a potential additive in concrete: consistency, strength and toxic metal immobilization properties. *NISCAIR-CSIR, India*. 79-86
- Pandey, D., M. Agrawal y J.S. Pandey.** (2010). Carbon footprint: current methods of estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 178(1-4), 135-160.
- Ramirez, V., Kutscher, C., Cantallopts, J.** (2019). Dirección de Estudio y Políticas Públicas. Mejores prácticas de gobernanza en materia de relaves. Comisión Chilena del Cobre.
- Ristić, N., Grdić, Z., Čurčić, G. T., Grdić, D., Krstić, D.** (2019). Properties of self-compacting concrete produced whit waste materials as mineral admixture. *Revista Romana De Materiales/ Romanian Journal of Materials*, 49(4), 568-580.
- Sernageomin, Catastro depósitos de relave en Chile.** (2020). <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/> (acceso julio 2022).
- Thomas, B. S., Damare, A., Gupta, R. C.** (2013). Strength and durability characteristics of copper tailing concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 894-900.
- Valenzuela, H.** (2018). Resistencia de un concreto $f'c=210$ kg/cm² con cemento sustituido en 5%, 10% y 15% por relave de la mina Antamina 59673 [Titulo de Ingeniería Civil, Universidad de San Pedro] <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/8043>
- Zabaleta, H., Egaña, J.,** (1988). Manual del Mortero, Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón (ICH).
- Zhang, Changsen, Tinigting Zhou, Qisheng Wu, Huajun Zhu y Peng Xu.** (2014). Mechanical performance and Microstructure of Cement containing copper tailing. *Asian Journal of Chemistry*. 1371-1315.

8 Anexos

8.1 Anexo A

En el siguiente anexo se presentan las distintas planificaciones, en la **Tabla A.1**, se observa el itinerario a seguir para la realización del experimento A, mientras que en la **Tala A.2** son observados los distintos días en los cuales se realizo las diferentes tareas para el término del experimento B.

Tabla A.1: Planificación para experimento A.

Probeta	PM	CC	7 días	14 días	28 días
CP	15-mar	16-mar	22-mar	29-mar	12-abr
RC10C1	21-mar	22-mar	29-mar	5-abr	19-abr
RC30C1	22-mar	23-mar	30-mar	6-abr	20-abr
RA30C1	4-abr	6-abr	13-abr	20-abr	4-may
RA50C1	4-abr	6-abr	13-abr	20-abr	4-may

Tabla A.2: Planificación para experimento B.

Probeta	PM	CC	7 días	14 días	28 días
CP 1:2	17-may	18-may	25-may	1-jun	15-jun
CP 1:4	17-may	18-may	25-may	1-jun	15-jun
RC10 1:2	18-may	19-may	26-may	2-jun	16-jun
RC10 1:4	18-may	19-may	26-may	2-jun	16-jun
RC30 1:2	19-may	20-may	27-may	3-jun	17-jun
RC30 1:4	19-may	20-may	27-may	3-jun	17-jun
RA30 1:2	22-jun	24-jun	1-jul	8-jul	22-jul
RA30 1:4	22-jun	24-jun	1-jul	8-jul	22-jul
RA50 1:2	24-jun	28-jun	5-jul	12-jul	26-jul
RA50 1:4	24-jun	28-jun	5-jul	12-jul	26-jul

Donde:

- PM: Preparación de la mezcla.
- CC: Comienzo de curado.

8.2 Anexo B

FLEXION	PROBETA	7 DIAS									14 DIAS						28 DIAS													
		Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO					Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO				Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO										
					Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación				Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]				Desviación	Peso [gr]	Fuerza [Ton]		Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación				
CP	CP.1	542	0.041	9.58						553	0.081	19.03						553	0.038	8.91										
	CP.2	538	0.068	15.85	538.67	0.062	-0.02	14.44	4.33	550	0.104	24.4	548.67	0.083	0.021	19.38	4.854	551	0.102	23.31	549.67	0.081	0.037	18.68	8.468				CP	
	CP.3	536	0.076	17.90						543	0.063	14.71						545	0.102	23.83										
RC10M1	RC10M1.1	547	0.072	16.99						545	0.092	21.49						548	0.095	22.18										
	RC10M1.2	550	0.079	18.42	549.67	0.078	-0.01	18.29	1.24	550	0.097	22.78	547.33	0.094	0.003	21.98	0.696	545	0.114	26.75	546.00	0.105	0.010	24.51	2.286				RC10M1	
	RC10M1.3	552	0.083	19.45						547	0.093	21.68						545	0.105	24.59										
RC30M1	RC30M1.1	521	-	-						535	0.005	0.55						537	0.058	13.53										
	RC30M1.2	524	0.001	0.016	523.33	0.001	N/A	0.02	N/A	550	0.001	0.25	544.00	0.003	N/A	0.40	N/A	546	0.04	9.34	543.00	0.045	0.011	10.59	2.556				RC30M1	
	RC30M1.3	525	-	-						547	-	-						546	0.038	8.9										
RA30M1	RA30M1.1	571	0.07	16.42						576	0.098	23.04						589	0.037	0.865										
	RA30M1.2	572	0.075	17.48	571.33	0.072	0.00	16.95	0.53	585	0.101	23.76	577.00	0.101	0.003	23.68	0.599	582	0.172	40.2	583.33	0.126	0.077	26.84	22.499				RA30M1	
	RA30M1.3	571	0.072	16.95						570	0.104	24.23						579	0.168	39.46										
RA50M1	RA50M1.1	560	0.042	9.9						565	0.055	12.88						588	0.127	29.83										
	RA50M1.2	574	0.044	10.35	569.33	0.041	0.00	9.70	0.76	569	0.063	14.86	566.33	0.058	0.004	13.63	1.074	588	0.126	29.48	587.00	0.131	0.008	30.79	1.979				RA50M1	
	RA50M1.3	574	0.038	8.86						565	0.056	13.15						585	0.141	33.07										

Figura B.1: Resultados para ensayos de flexión, experimento A.

COMPRESIÓN	PROBETA	7 DIAS							14 DIAS							28 DIAS									
		Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO				Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO				Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO									
				Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación			Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación			Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación						
CP	CP.1	CP.1.1	0.924	57.72	0.952	0.18	59.50	11.43	1.664	104.00	1.633	0.19	102.05	11.68	1.568	98.00	1.814	0.18	113.39	11.12	CP				
		CP.1.2	0.650	40.62					1.639	102.42					1.765	110.32									
	CP.2	CP.2.1	0.865	54.08	1.844	115.22	1.441	90.06	1.391	86.97	1.818	113.61	1.636	102.25	1.606	100.36	1.995	122.21	1.889	118.06		2.055	128.42		
		CP.2.2	1.092	68.26																				1.341	83.78
	CP.3	CP.3.1	1.160	72.51	1.265	79.03	1.323	82.70	1.726	107.90	1.465	0.19	91.52	11.70	1.995	122.21	1.889	118.06	2.055	128.42		1.787	111.71		
		CP.3.2	1.021	63.80																				1.341	83.78
	RC10M1	RC10M1.1	RC10M1.1.1	0.952	59.47	1.164	0.19	72.72	11.76	0.623	38.95	0.545	0.09	34.07	5.81	0.694	43.35	0.779	0.12	48.69		7.66	RC10M1		
			RC10M1.1.2	1.279	79.93					0.420	26.26					0.606	37.87								
		RC10M1.2	RC10M1.2.1	1.358	84.86	0.435	27.16	0.594	37.15	0.622	38.86	0.577	36.06	0.937	58.58	0.787	49.16	3.977	248.56	2.809		175.59		3.822	238.87
			RC10M1.2.2	0.969	60.57																				
		RC10M1.3	RC10M1.3.1	1.073	67.06	2.738	171.38	2.027	126.68	2.578	161.09	1.783	111.42	2.487	155.45	3.712	231.99	3.302	0.59	206.72		36.64		RA30M1	
			RC10M1.3.2	1.350	84.40																				1.510
RC30M1	RC30M1.1	RC30M1.1.1	0.334	20.89	0.340	0.04	21.21	2.33	0.994	62.13	1.373	0.45	85.79	28.23	2.202	137.61	2.830	0.76	176.83	47.71	RC30M1				
		RC30M1.1.2	0.351	21.92					0.820	113.76					3.580	223.72									
	RC30M1.2	RC30M1.2.1	0.364	22.73	0.970	60.64	0.921	57.55	1.734	108.36	0.970	60.64	0.921	57.55	2.079	129.96	3.495	218.41	2.830	0.76		176.83	47.71		
		RC30M1.2.2	0.283	17.67																				0.970	60.64
	RC30M1.3	RC30M1.3.1	0.316	19.74	2.738	171.38	2.027	126.68	2.578	161.09	1.783	111.42	2.487	155.45	3.712	231.99	3.302	0.59	206.72	36.64		RA30M1			
		RC30M1.3.2	0.389	24.31																			1.510	94.37	1.797
RA30M1	RA30M1.1	RA30M1.1.1	1.428	89.23	1.503	0.27	93.93	16.86	0.994	62.13	1.373	0.45	85.79	28.23	2.202	137.61	2.830	0.76	176.83	47.71	RA30M1				
		RA30M1.1.2	1.320	82.49					0.820	113.76					3.580	223.72									
	RA30M1.2	RA30M1.2.1	1.288	80.51	0.970	60.64	0.921	57.55	1.734	108.36	0.970	60.64	0.921	57.55	2.079	129.96	3.495	218.41	2.830	0.76		176.83	47.71		
		RA30M1.2.2	1.858	116.10																				0.970	60.64
	RA30M1.3	RA30M1.3.1	1.832	114.50	2.738	171.38	2.027	126.68	2.578	161.09	1.783	111.42	2.487	155.45	3.712	231.99	3.302	0.59	206.72	36.64		RA30M1			
		RA30M1.3.2	1.292	80.76																			1.510	94.37	1.797
RA50M1	RA50M1.1	RA50M1.1.1	0.909	56.84	0.708	0.19	44.26	11.74	0.994	62.13	1.373	0.45	85.79	28.23	2.202	137.61	2.830	0.76	176.83	47.71	RA50M1				
		RA50M1.1.2	0.691	43.21					0.820	113.76					3.580	223.72									
	RA50M1.2	RA50M1.2.1	0.474	29.65	0.970	60.64	0.921	57.55	1.734	108.36	0.970	60.64	0.921	57.55	2.079	129.96	3.495	218.41	2.830	0.76		176.83	47.71		
		RA50M1.2.2	0.553	34.54																				0.970	60.64
	RA50M1.3	RA50M1.3.1	0.677	42.31	2.738	171.38	2.027	126.68	2.578	161.09	1.783	111.42	2.487	155.45	3.712	231.99	3.302	0.59	206.72	36.64		RA30M1			
		RA50M1.3.2	0.944	59.01																			1.510	94.37	1.797

Figura B.2: Resultados de ensayo a compresión, experimento A.

FLEXION	PROBETA	7 DIAS								14 DIAS						28 DIAS											
		Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO					Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO					Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO						
					Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación				Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación				Peso [gr]		Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación	
FLEXION	CP 1:2	CP 1:2.1	560	0.128	29.96	561.67	0.13	0.003	30.62	0.59	564	0.214	50.11	564.33	0.22	0.008	50.69	1.801	563	0.224	52.59	564.33	0.23	0.008	53.54	1.715	CP 1:2
		CP 1:2.2	564	0.131	30.8						565	0.225	52.71						565	0.224	52.51						
		CP 1:2.3	561	0.133	31.10						564	0.21	49.25						565	0.237	55.52						
	RC10M1 1:2	RC10M1 1:2.1	557	0.131	30.72	554.00	0.12	0.011	28.45	2.49	555	0.119	39.62	555.33	0.17	0.042	43.22	3.261	564	0.2	46.94	565.33	0.23	0.028	54.01	6.406	RC10M1 1:2
		RC10M1 1:2.2	556	0.123	28.84						556	0.188	44.05						568	0.254	59.43						
		RC10M1 1:2.3	549	0.11	25.78						555	0.196	45.98						564	0.237	55.66						
	RC30M1 1:2	RC30M1 1:2.1	550	0.068	15.94	551.33	0.07	0.005	15.39	1.15	559	0.113	26.47	559.33	0.11	0.003	26.63	0.635	559	0.162	37.97	561.67	0.17	0.013	39.20	3.113	RC30M1 1:2
		RC30M1 1:2.2	555	0.06	14.07						560	0.111	26.09						562	0.157	36.89						
		RC30M1 1:2.3	549	0.069	16.16						559	0.117	27.33						564	0.182	42.74						
RA30M1 1:2	RA30M1 1:2.1	574	0.211	49.4	572.33	0.22	0.019	51.15	4.45	559	0	0	559.33	0.00	0.000	0.00	0.000	559	0	0	561.67	0.00	0.000	0.00	0.000	RA30M1 1:2	
	RA30M1 1:2.2	569	0.204	47.84						560	0	0						562	0	0							
	RA30M1 1:2.3	574	0.24	56.2						559	0	0						564	0	0							
RAS0M1 1:2	RAS0M1 1:2.1	545	0.18	42.22	545.00	0.17	0.008	41.01	1.74	539	0	0	541.00	0.00	0.000	0.00	0.000	545	0	0	544.33	0.00	0.000	0.00	0.000	RAS0M1 1:2	
	RAS0M1 1:2.2	545	0.178	41.79						541	0	0						546	0	0							
	RAS0M1 1:2.3	545	0.166	39.01						543	0	0						542	0	0							

Figura B.3: Resultados ensayo a flexión, dosificación 1:2, experimento B.

COMPRESIÓN	PROBETA	Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	7 DIAS				14 DIAS				28 DIAS				CP 1:2																	
				PROMEDIO				PROMEDIO				PROMEDIO																					
				Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación	Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación	Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación																		
CP 1:2	CP.1 1:2	CP.1.1	2.877	179.81	2.696	0.35	168.513	22.04	4.633	289.55	4.077	0.62	254.807	39.04	4.476	279.78	5.231	0.84	326.947	52.23													
		CP.1.2	2.207	137.97					3.511	219.45					6.085	380.31																	
		CP.2.1	2.552	159.53					3.516	219.74					5.807	362.93																	
	CP.2 1:2	CP.2.2	3.004	187.73					4.692	293.24					4.486	280.37																	
		CP.3 1:2	CP.3.1	2.433					152.07	4.615					288.45	4.459					278.69												
			CP.3.2	3.103					193.97	3.495					218.41	6.074					379.6												
	RC10M1 1:2	RC10M1.1 1:2	RC10M1.1.1	2.636					164.73	2.265					0.43	141.565					26.87	3.671	229.41	3.115	0.63	194.698	39.58	3.834	239.63	4.551	0.85	284.395	53.13
			RC10M1.1.2	1.883					117.68													2.536	158.52					5.465	341.57				
		RC10M1.2 1:2	RC10M1.2.1	2.684					167.74													2.572	160.73					5.273	329.54				
			RC10M1.2.2	1.839					114.92													3.608	225.47					3.704	231.47				
		RC10M1.3 1:2	RC10M1.3.1	1.898					118.63													2.512	156.98					3.799	237.42				
			RC10M1.3.2	2.651					165.69													3.793	237.08					5.228	326.74				
RC30M1 1:2		RC30M1.1 1:2	RC30M1.1.1	1.209	75.56	1.060	0.15	66.232	9.15		2.055	128.46	1.745	0.29			109.542	17.58	2.244	140.23		2.672	0.40					166.965	25.07				
			RC30M1.1.2	0.891	55.70						1.459	91.19							3.001	187.56													
	RC30M1.2 1:2	RC30M1.2.1	0.942	58.85	1.496					93.49	3.059	191.17																					
		RC30M1.2.2	1.146	71.64	1.924					120.24	2.346	146.65																					
	RC30M1.3 1:2	RC30M1.3.1	0.955	59.70	2.036					127.22	2.331	145.70																					
		RC30M1.3.2	1.215	75.94	1.498					96.65	3.048	190.48																					
	RA30M1 1:2	RA30M1.1 1:2	RA30M1.1.1	4.380	273.78					4.771	0.43	298.168			26.94	5.596			349.76	5.942	0.38			371.490	23.28	6.769	423.06			6.825	0.38	426.565	24.04
			RA30M1.1.2	5.085	317.81											6.283			392.70							7.075	442.19						
RA30M1.2 1:2		RA30M1.2.1	4.341	271.33	5.433	340.21	6.560	410.00																									
		RA30M1.2.2	5.198	324.86	6.264	391.50	7.003	437.69																									
RA30M1.3 1:2		RA30M1.3.1	4.417	276.08	5.830	364.35	6.239	389.96																									
		RA30M1.3.2	5.202	325.15	6.247	390.42	7.304	456.49																									
RA50M1 1:2	RA50M1.1 1:2	RA50M1.1.1	3.428	214.27	2.500	1.96	156.235	24.45	3.944	246.51	4.269	0.32	266.810	20.07	4.797	299.83	4.955	0.31	309.700	19.45													
		RA50M1.1.2	4.001	250.03					4.704	294.02					4.986	311.65																	
	RA50M1.2 1:2	RA50M1.2.1	3.404	212.74					3.943	246.44					4.695	293.42																	
		RA50M1.2.2	0.000	0.000					4.521	282.54					5.360	334.99																	
	RA50M1.3 1:2	RA50M1.3.1	0.000	0.000					4.092	255.76					5.283	330.19																	
		RA50M1.3.2	4.166	260.37					4.410	275.59					4.610	288.12																	

Figura B.4: Resultados ensayo de compresión, dosificación 1:2, experimento B.

FLEXION	PROBETA	7 DIAS									14 DIAS						28 DIAS									
		Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO					Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO				Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO						
					Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación				Peso [gr]	Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]				Desviación	Peso [gr]	Fuerza [Ton]		Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación
CP 1:4	CP 1:4.1	553	0.073	17.2						559	0.115	26.89						543	0.122	28.59						CP 1:4
	CP 1:4.2	558	0.061	14.27	556.67	0.07	0.006	15.52	1.51	557	0.108	25.21	559.00	0.11	0.007	26.78	1.518	547	0.134	31.57	545.33	0.13	0.013	31.60	3.025	
	CP 1:4.3	559	0.064	15.10						561	0.121	28.24						546	0.148	34.64						
RC10M1 1:4	RC10M1 1:4.1	542	0.055	12.99						553	0.094	22.03						540	0.095	22.18						RC10M1 1:4
	RC10M1 1:4.2	545	0.048	11.15	544.67	0.05	0.005	12.51	1.19	554	0.095	22.36	553.67	0.10	0.004	22.74	0.958	538	0.095	22.31	539.00	0.09	0.003	21.87	0.653	
	RC10M1 1:4.3	547	0.057	13.38						554	0.102	23.83						539	0.09	21.12						
RC30M1 1:4	RC30M1 1:4.1	555	0.043	10.11						543	0.046	10.68						550	0.058	13.68						RC30M1 1:4
	RC30M1 1:4.2	552	0.042	9.81	557.00	0.04	0.002	9.77	0.36	544	0.054	12.72	544.00	0.05	0.005	11.36	1.181	554	0.069	16.24	552.33	0.06	0.006	15.14	1.316	
	RC30M1 1:4.3	564	0.04	9.4						545	0.046	10.67						553	0.066	15.49						
RA30M1 1:4	RA30M1 1:4.1	579	0.149	34.97						576	0	0						578	0	0						RA30M1 1:4
	RA30M1 1:4.2	580	0.143	33.59	580.33	0.15	0.007	35.12	1.62	571	0	0	573.67	0.00	0.000	0.00	0.000	580	0	0	579.33	0.00	0.000	0.00	0.000	
	RA30M1 1:4.3	582	0.157	36.81						574	0	0						580	0	0						
RA50M1 1:4	RA50M1 1:4.1	562	0	0						554	0	0						551	0	0						RA50M1 1:4
	RA50M1 1:4.2	557	0	0	558.00	0.00	0.000	0.00	0.00	555	0	0	554.33	0.00	0.000	0.00	0.000	552	0	0	552.00	0.00	0.000	0.00	0.000	
	RA50M1 1:4.3	555	0	0						554	0	0						553	0	0						

Figura B.5: Resultados ensayo de flexión, dosificación 1:4, experimento B.

PROBETA			7 DIAS							14 DIAS							28 DIAS						
			Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO				Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO				Fuerza [Ton]	Presión [Kg/cm ²]	PROMEDIO						
					Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación			Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación			Fuerza [Ton]	Desviación	Presión [Kg/cm ²]	Desviación			
COMPRESIÓN	CP 1:4	CP.1 1:4	CP.1.1	1.896	118.47	1.664	0.21	104.000	13.19	1.984	124.02	2.378	0.32	148.625	19.92	2.691	168.17	2.516	0.22	157.228	13.56	CP 1:4	
			CP.1.2	1.469	91.78					2.699	168.67					2.261	141.30						
		CP.2 1:4	CP.2.1	1.731	108.16					2.265	141.55					2.774	173.35						
			CP.2.2	1.418	88.64					2.664	166.51					2.354	147.14						
		CP.3 1:4	CP.3.1	1.903	118.91					2.602	162.63					2.661	166.29						
			CP.3.2	1.569	98.04					2.054	128.37					2.354	147.12						
	RC10M1 1:4	RC10M1.1 1:4	RC10M1.1.1	1.128	70.48	1.207	0.19	75.418	12.13	1.514	94.64	1.850	0.29	115.598	17.88	1.930	120.60	1.794	0.19	112.135	12.12	RC10M1 1:4	
			RC10M1.1.2	1.265	79.05					2.065	129.04					1.668	104.27						
		RC10M1.2 1:4	RC10M1.2.1	1.030	64.35					2.133	133.29					1.591	99.44						
			RC10M1.2.2	1.469	91.81					1.624	101.49					1.943	121.43						
		RC10M1.3 1:4	RC10M1.3.1	0.979	61.18					1.639	102.41					2.028	126.75						
			RC10M1.3.2	1.370	85.64					2.124	132.72					1.605	100.32						
	RC30M1 1:4	RC30M1.1 1:4	RC30M1.1.1	0.710	44.36	0.833	0.12	52.063	7.24	0.957	59.84	0.858	0.13	53.625	8.30	1.185	74.04	1.346	0.18	84.142	11.17	RC30M1 1:4	
			RC30M1.1.2	0.854	53.36					0.739	46.17					1.486	92.85						
		RC30M1.2 1:4	RC30M1.2.1	0.932	58.26					0.777	48.57					1.187	74.19						
			RC30M1.2.2	0.724	45.25					0.926	57.87					1.517	94.81						
		RC30M1.3 1:4	RC30M1.3.1	0.781	48.80					1.036	64.76					1.179	73.69						
			RC30M1.3.2	0.998	62.35					0.713	44.54					1.524	95.27						
	RA30M1 1:4	RA30M1.1 1:4	RA30M1.1.1	2.445	152.83	2.548	0.31	159.267	19.41	3.280	204.98	3.414	0.23	213.332	14.65	3.784	236.50	4.031	0.23	251.908	14.12	RA30M1 1:4	
			RA30M1.1.2	2.854	178.38					3.549	221.80					4.250	265.61						
		RA30M1.2 1:4	RA30M1.2.1	2.173	135.82					3.302	206.36					3.854	240.91						
			RA30M1.2.2	2.799	174.92					3.688	230.47					4.293	268.33						
		RA30M1.3 1:4	RA30M1.3.1	2.216	138.51					3.069	191.81					3.852	240.73						
			RA30M1.3.2	2.802	175.14					3.593	224.57					4.150	259.37						
RA50M1 1:4	RA50M1.1 1:4	RA50M1.1.1	2.304	143.99	2.505	0.25	156.522	15.60	2.663	166.46	2.826	0.24	176.648	15.12	3.227	201.70	3.275	0.20	204.677	12.70	RA50M1 1:4		
		RA50M1.1.2	2.762	172.60					3.176	198.51					3.460	216.23							
	RA50M1.2 1:4	RA50M1.2.1	2.284	142.74					2.635	164.70					3.421	213.82							
		RA50M1.2.2	2.752	171.99					2.985	186.54					3.019	188.71							
	RA50M1.3 1:4	RA50M1.3.1	2.248	140.52					2.562	160.13					3.465	216.54							
		RA50M1.3.2	2.677	167.29					2.937	183.55					3.057	191.06							

Figura B.6: Resultados de ensayo a compresión, dosificación 1:4, experimento B.