



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DE LA NORMA EUROPEA  
EN 12620 PARA LA REUTILIZACIÓN RESIDUOS DE  
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) COMO AGREGADO  
GRUESO EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN  
ESTRUCTURAL EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

**CONSTANZA ANDREA NAVARRO TORRES**

**PROFESOR GUÍA:  
YURI TOMICIC CALVO**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA  
DAVID CAMPUSANO BROWN**

**SANTIAGO DE CHILE  
2023**

## **ESTUDIO SOBRE LA APLICACIÓN DE LA NORMA EUROPEA EN 12620 PARA LA REUTILIZACIÓN RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) COMO AGREGADO GRUESO EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL EN CHILE**

El presente estudio sobre construcción circular busca evaluar la posibilidad de implementar una metodología para la reducción de desechos de construcción para ser usados bajo condiciones establecidas en la norma EN 12620, como Agregados Gruesos en la confección de hormigón. Para poder contar con una primera aproximación a este objetivo, a modo de caso práctico, la metodología consistió en obtener escombros en una planta de prefabricados de hormigón para la construcción. A partir de estos escombros se obtuvo un árido reciclado y se procedió a ejecutar los ensayos correspondientes a las *Normas Europeas sobre Agregados Reciclados*, considerando que la última actualización de la norma NCh163, en proceso de estudio, aún no define claramente su uso y el porcentaje de incorporación al hormigón está más limitado que en Europa. Con estos ensayos se busca verificar la factibilidad de reciclar todo el deshecho generado en la construcción y demolición de estructuras de hormigón.

Antes de realizar el experimento con la metodología descrita anteriormente, se realiza un repaso por las Normas Europeas y sus orígenes para luego hacer un análisis comparativo entre diferentes estudios y avances realizados en Chile de forma teórica. Entre los avances realizados en Chile se destacan tres estudios, los que concluyen que a mayor cantidad de árido reciclado menor es la resistencia final; en estos se usaron porcentajes de reemplazo de 30% 50% y 100%. También concluyen que el árido reciclado tiene una mayor absorción de agua que el árido natural, por lo que requiere un tratamiento de saturación previa a su incorporación a la mezcla. Siguiendo con los avances realizados en Chile, se detalla la información sobre la Hoja de Ruta Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y Economía Circular en Construcción 2035, realizada en 2020. De este análisis comparativo se concluye que, en primer lugar, no se ha llegado a encontrar la dosis de Árido Reciclado Grueso máxima admisible como reemplazo de árido natural de origen pétreo, tal que el hormigón no vea afectadas significativamente sus propiedades, principalmente que no pierda resistencia, a pesar de que se encuentren soluciones diferentes, como su empleo en estructuras de menores resistencia o pavimentos.

Luego de realizar este análisis, se procedió con la implementación del caso de estudio, empleando la metodología experimental basada en la normativa europea. Se obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a la aplicación de la norma en los ensayos realizados en el laboratorio de la empresa Bottai, ya que la resistencia de la mezcla de prueba que incluye árido reciclado no disminuyó significativamente en comparación con la mezcla patrón al agregar un máximo de 20% de árido reciclado, valor que corresponde a la dosificación de RCD descrita en la Norma Europea EN 12620. También se logró resolver el problema de aumento de absorción que poseen los áridos reciclados, para mantener la humedad de la mezcla. Con estos resultados se propuso un plan de aplicación de la norma en Chile, que se debe ajustar según las disposiciones de cada planta, junto con recomendaciones, dejando el camino abierto para que futuros estudios puedan concluir otras propuestas de aplicación de esta norma que aporten a la Construcción Circular en Chile.

*A mi mamá y a mi papá...*

## Agradecimientos

Creo que esta parte es la más difícil de escribir sobre todo porque este es uno de los momentos más importantes de mi vida, y hacer un recorrido por toda mi experiencia universitaria se torna un poco intenso. Quiero agradecer a la Escuela de Ingeniería por permitirme formarme como profesional, agradezco haber tenido la oportunidad de tener mi intercambio en Portugal ya que eso me permitió escoger y elegir a qué me quiero dedicar en mi vida, partiendo por esta memoria. Agradecer especialmente a los profesores David Campusano, Yuri Tomacic y Federico Delfín, por permitirme trabajar en el tema que escogí y por poner su confianza en mí. A Ignacio Contreras del laboratorio en Bottai por ayudarme en todo lo que tenía que hacer, gracias a ti el experimento fue posible.

Quiero agradecer a mi familia, a mis padres Jeannette y Fabián, lo mínimo que les debo es la vida, gracias por apoyarme en todo sentido, por ser los mejores padres, compañeros y amigos, por escucharme, por alentarme, por confiar en mí, este trabajo se lo dedico a ustedes. Gracias por contenerme cuando lo necesitaba, por decirme las cosas como son siempre desde el amor y la ternura, soy una gran mujer gracias a ustedes. No me olvido de mis familiares, a mis primas, mis abuelas y abuelos, tías y tíos, por hacerme crecer en un espacio seguro, lleno de respeto y amor.

Agradecer mis civiles favs, Marcela y Felipe, porque no sólo fueron los mejores amigos que hice en la carrera sino también me permitieron aprender en lo académico, gracias por ayudarme siempre, sin dudarlos, por entender mis procesos, espero estar retribuyéndoles ese amor como se lo merecen y cuidarlos para toda la vida, gracias por validar mis emociones y sentimientos y por siempre tener una palabra de aliento, son personas maravillosas y tengo la suerte de haberlos conocido.

A mis xikis, por ser siempre mi espacio seguro, por haberme visto crecer por casi 14 años, por quererme en todas mis etapas, ha sido un placer verlas crecer a ustedes también, Javiera, Tamara, Claudia y Mayra, las amo inimaginablemente. También a las amigas y amigos que hice en el camino, y que ahora forman parte de mi corazón, especialmente a Carla y Andrea por siempre estar ahí, porque me han ayudado a crecer, a entenderme y a quererme. Gracias a todas ustedes por ser mujeres maravillosas que me llenan de inspiración cada día.

También agradecer a Matías, por quererme incondicionalmente, gracias por ser mi amigo, espero estar ahí siempre para ti. A Diego, por haber llegado en el momento más difícil de este proceso y llenarlo de paz y confianza, agradezco la motivación que me has dado y querer siempre dar lo mejor de ti. A Pablo, en especial por haber sido mi familia en Portugal, me tranquilizaba que estuvieses a 4 horas de distancia, gracias por protegerme y por cuidarme siempre.

No quiero dejar de lado a mis gatos, Alisa y Haku, he tenido la suerte de que llegaran a mi vida, en el momento preciso, gracias por calmarme el corazón y por acompañarme 24/7 sin condición. A mi Pepita, aunque ya no estás en este mundo, gracias por haberme permitido ser tu humana por tantos años, gracias por tantas risas y juegos, por acompañarme y por ser mi hermana perruna, única e irremplazable.

Se despide con mucho amor,  
Coni  
\*llora\*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
2.1	OBJETIVO GENERAL .....	2
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
<b>3</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
3.1	HORMIGÓN ESTRUCTURAL .....	3
3.2	CONSTRUCCIÓN CIRCULAR.....	3
3.2.1	<i>Economía Circular</i> .....	3
3.3	ÁRIDOS .....	4
3.4	AGREGADOS RECICLADOS SEGÚN LA NORMA EUROPEA EN 12620.....	5
<b>4</b>	<b>NORMAS EUROPEAS</b> .....	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>8</b>
5.1	ESTUDIOS REALIZADOS EN CHILE .....	9
5.2	HOJA DE RUTA RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) Y ECONOMÍA CIRCULAR EN CONSTRUCCIÓN 2035.....	12
5.2.1	<i>Actualizaciones y avances</i> .....	13
<b>6</b>	<b>METODOLOGÍA DE CLASIFICACIÓN PARA REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS SEGÚN NORMA EUROPEA EN 12620</b> .....	<b>15</b>
6.1	OBTENCIÓN Y SEPARACIÓN DE LAS MUESTRAS .....	15
6.2	CLASIFICACIÓN DEL ÁRIDO RECICLADO.....	17
6.3	REDUCCIÓN DE LA MUESTRA .....	17
<b>7</b>	<b>METODOLOGÍA PARA ENSAYOS SEGÚN NORMAS CHILENAS</b> .....	<b>18</b>
7.1	ENSAYOS DE HORMIGÓN .....	19
7.1.1	<i>Hormigón Fresco</i> .....	19
7.1.2	<i>Hormigón endurecido</i> .....	20
<b>8</b>	<b>EJEMPLO DE APLICACIÓN EN UNA PLANTA DE CONSTRUCCIÓN EN LA REGIÓN METROPOLITANA</b> .....	<b>21</b>
8.1	ESTADO DE LOS RESIDUOS .....	22
8.2	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA .....	23
8.2.1	<i>Obtención y separación de las muestras</i> .....	23
8.2.2	<i>Clasificación del Árido Reciclado</i> .....	25
8.2.3	<i>Análisis de granulometría</i> .....	27
8.2.4	<i>Determinación de la dosificación de la mezcla</i> .....	28
8.2.5	<i>Realización y ensayo de probetas</i> .....	31
8.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	34
<b>9</b>	<b>ANÁLISIS CRÍTICO DE ESTUDIOS O PROYECTOS REALIZADOS EN CHILE</b> .....	<b>36</b>
<b>10</b>	<b>PROPUESTA PARA APLICAR EN CHILE</b> .....	<b>37</b>
10.1	ANÁLISIS CRÍTICO Y RECOMENDACIONES .....	37
<b>11</b>	<b>CONCLUSIÓN</b> .....	<b>38</b>
<b>12</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>39</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>42</b>	
<b>ANEXO B</b> .....	<b>45</b>	
<b>ANEXO C</b> .....	<b>46</b>	

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Esquema Economía Circular.....	4
Ilustración 2: Esquema de clasificación de residuos.....	5
Ilustración 3: Resultados Experimento 2005 .....	9
Ilustración 4: Resultados estudio 2011 .....	10
Ilustración 5: Microfotografía SEM BSEI (Serpell, 2011).....	11
Ilustración 6: Esquema Agregados Reciclados .....	11
Ilustración 7: Pasos de la división de la muestra en Divisor Riffle según norma EN 932-2.....	18
Ilustración 8: Planta de prefabricados Bottai .....	21
Ilustración 9: Estado de los residuos (a) .....	22
Ilustración 10: Estado de los residuos (b).....	22
Ilustración 11: Estado de los residuos (c) .....	23
Ilustración 12: Muestra M0 .....	23
Ilustración 13: Muestra reducida M1 .....	24
Ilustración 14: Momento en el que se vierte agua a la muestra.....	25
Ilustración 15: Obtención de Vf .....	25
Ilustración 16: Clasificación Ru .....	26
Ilustración 17: Clasificación Rb .....	26
Ilustración 18: Gravilla Reciclada de 3/8" .....	29
Ilustración 19: Gravilla Reciclada de 3/4" .....	29
Ilustración 20: Betonera de la planta Bottai .....	30
Ilustración 21: Obtención de la Mezcla .....	30
Ilustración 22: Mezcla final a Ensayar .....	30
Ilustración 23: Mesa Vibratoria.....	31
Ilustración 24: Probetas .....	31
Ilustración 25: Prensa para Ensayo a Compresión .....	32
Ilustración 26: Roturas correctas en probetas cilíndricas (NCh 1037).....	33
Ilustración 27: Roturas en probetas realizadas .....	33
Ilustración 28: Gráfico comparativo.....	34
Ilustración 29: Tabla de clasificación de áridos rescatada de la norma EN 12620.....	42
Ilustración 30: Ejemplo de toma de datos según EN 933-11.....	43
Ilustración 31: Continuación ejemplo de toma de datos según EN 933-11.....	43
Ilustración 32: Continuación ejemplo de toma de datos según EN 933-11.....	44

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1: Clasificación de áridos según tamaño.....</b>	<b>5</b>
<b>Tabla 2: Porción mínima para la prueba .....</b>	<b>15</b>
<b>Tabla 3: Masa mínima para M1.....</b>	<b>15</b>
<b>Tabla 4: Constituyentes .....</b>	<b>16</b>
<b>Tabla 5: Clasificación del árido reciclado según EN 12620:2002.....</b>	<b>17</b>
<b>Tabla 6: Resultado de masas .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 7: Masas de los elementos en kg .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabla 8: Proporciones de los elementos.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 9: Determinación de densidades reales y neta y de la absorción de aguas: .....</b>	<b>27</b>
<b>Tabla 10: Dosificación Soleras Bottai 2400 Kg .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 11: Dosificación Soleras Bottai 300 Kg .....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 12: Dosificación final .....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 13: Resultados ensayo a compresión (Anexo 3).....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 14: Ensayo compresión árido Virgen (original) .....</b>	<b>34</b>

# 1 Introducción y motivación

En Chile, la construcción de edificios va en crecimiento y con esto los desechos van aumentando año a año. Tanto para los nuevos edificios como para las reparaciones de los ya existentes, es crucial implementar un sistema que promueva la construcción circular. Si bien la información sobre la cantidad de residuos obtenidos en construcciones, reparaciones y demoliciones es limitada, se estima que corresponden a un tercio del total de los residuos generados. Según el Sexto Reporte del Estado del Medio Ambiente (2021) sólo los residuos de la construcción de edificios para uso residencial y no residencial corresponden a 781.277 toneladas [6]. Por otro lado, la extracción de áridos, que ha tenido el mismo desarrollo marcado en Chile de la mano del crecimiento de la construcción origina una disminución de la superficie vegetal y nativa debido a la pérdida del valor de los suelos.

Solo en la Región Metropolitana se sabe que hay más de 73 vertederos ilegales de residuos sólidos, correspondientes a 400 hectáreas y unos 600 microbasurales. Se identifican, además, 44 rellenos sanitarios en 13 regiones y 28 escombreras irregulares, que son utilizados para disposición final. En consecuencia, en la actualidad nueve regiones de Chile no cuentan con lugares para disposición autorizada de residuos sólidos asimilables, que en jerga nacional se han denominado escombros. [24]

Considerando la relevancia de estas cifras, se deben comenzar a implementar métodos para lograr una reducción y manejo sustentable de estos desechos a mediano y largo plazo, y una reducción de la extracción de materias primas. La presente investigación busca la viabilidad de lograr la economía circular en la construcción, partiendo desde las bases. Promoviendo un nuevo procedimiento para una etapa específica de la construcción que sería la obra gruesa, para luego extrapolar los resultados y ver la factibilidad de reutilizar todos los escombros de hormigón como agregados gruesos a los nuevos hormigones.

La motivación de este estudio nace debido a la realización del curso Circular Construction en la Universidade do Porto en 2021, donde se obtuvo conocimiento sobre la factibilidad de la reutilización de RCD sembrando la idea de que esto fuese aplicado en Chile, comenzando una investigación de los estudios anteriores realizados en el país y cómo han aportado en el avance de la construcción circular. Esta investigación puede lograr ser un apoyo a las distintas medidas que se han implementado en Chile en los últimos años. El 2021 fue publicada la Hoja de Ruta de Economía Circular, instrumento de planificación a largo plazo para transitar hacia una economía circular, con una visión que va mucho más allá del simple reciclaje y que se replantea el actual modelo de producción y consumo. Este estudio se suma a la "Hoja de Ruta RCD Economía Circular en Construcción" y la "Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos Chile 2040" presentadas en 2020. Además de la nueva actualización de la norma NCh163 Áridos para Morteros y Hormigones – Requisitos Generales.



## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

La presente memoria busca analizar la posibilidad de implementar la metodología de reutilización de hormigón descrita en la Norma Europea EN 12620 en Chile, con su especificación E471-2009, para así avanzar en la construcción circular.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar un análisis comparativo entre Chile y Europa en cuanto a la normativa de reutilización de RCD
- Revisar estudios anteriores realizados en Chile y analizar sus resultados.
- Recolectar escombros desechados en la empresa Bottai Prefabricados.
- Clasificar los escombros de hormigón como árido reciclado según Norma Europea.
- Obtener ensayos granulométricos y características de docilidad y resistencia del hormigón obtenido, mediante realización y ensayos de probetas.
- Realizar comparación de los resultados con los obtenidos en diferentes estudios realizados en Chile.

## **3 Marco Teórico**

En la presente sección se realizará una revisión bibliográfica general, con el fin de definir los conceptos importantes para el entendimiento de la memoria, permitiendo así estimar de antemano los posibles resultados que se obtendrán en el estudio.

### **3.1 Hormigón Estructural**

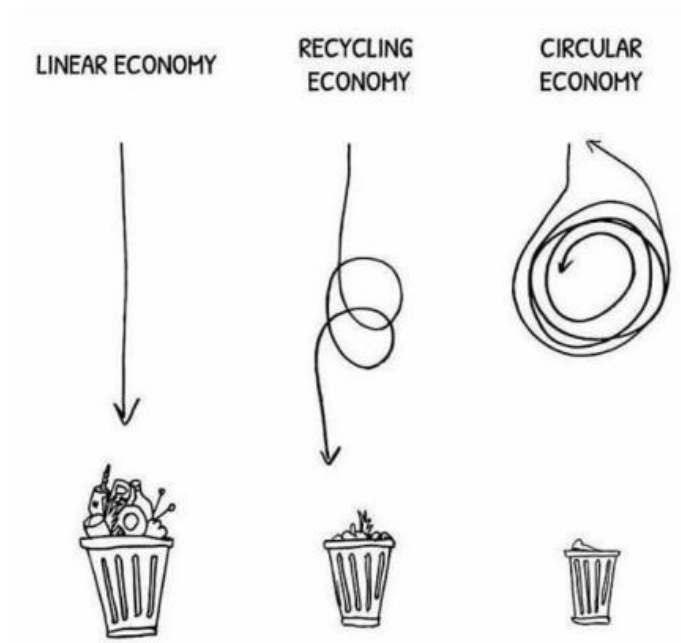
El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la construcción de obras civiles a nivel mundial. Este se obtiene a partir de la mezcla de cemento, arena, grava, agua y si es necesario agregados o aditivos, todos estos componentes cuidadosamente proporcionados. Esta mezcla resulta en una reacción química que permite la obtención de una masa homogénea, la que se endurece formando el hormigón. En esta etapa de endurecimiento, se deben tener cuidados especiales para asegurar que éste sea de alto estándar, estos cuidados corresponden al mantenimiento y control de las condiciones de humedad y temperatura según la norma chilena vigente [1]. Las propiedades del hormigón varían según los componentes que se le incorpora a la mezcla. Por ejemplo, para tener una mayor trabajabilidad la mezcla debe tener una mayor cantidad de agua, pero esto significa que tenga menor resistencia a la compresión, que es la propiedad más importante. La resistencia máxima de este material se alcanza a los 28 días comúnmente, y su valor varía normalmente entre 5 a 60 MPa.

### **3.2 Construcción Circular**

La Construcción Circular es la aplicación de la Economía Circular en la construcción, logrando que los materiales no se descarten luego de ser utilizados, frenando así la extracción de materias primas y reduciendo los escombros en los vertederos.

#### **3.2.1 Economía Circular**

La economía circular es un modelo base de restauración y regeneración de recursos (materiales, componentes, productos y servicios) con la preservación de su valor y su usabilidad por el mayor periodo de tiempo posible evitando la producción de desechos y maximizando la reutilización, la que consiste en el uso repetido de los materiales para el mismo propósito para lo que fueron hechos, manteniendo el valor económico y de uso. En otras palabras, el objetivo clave de una economía circular es mantener el valor económico y la utilidad de las existencias de objetos y materiales fabricados lo más alto posible durante el mayor tiempo posible [3].



**Ilustración 1: Esquema Economía Circular**

### 3.3 Áridos

Se refiere a materiales minerales, sólidos inertes, que con la distribución de tamaños de partículas (granulometría) adecuada se usan para fabricación de productos artificiales resistentes, mediante adición de aglomerantes hidráulicos o ligantes bituminosos.

Según la norma ACI116, lo áridos son material granular tal como arena, grava, roca triturada, hormigón a base de cemento hidráulico triturado, o escoria de fundición de acero, que se usa con un medio cementante hidráulico para producir Hormigón mortero u otros. Y según la NCh163 son material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaños estables. [9]

La función de los áridos en el hormigón es aportar un relleno económico formando el esqueleto rígido el que corresponde a entre el 65% y el 80% del volumen total. Aportan resistencia mecánica para que el hormigón pueda resistir los esfuerzos, aportan durabilidad a las condiciones de servicio y a reducir los cambios volumétricos resultantes del proceso de fraguado y endurecimiento y de los cambios de humedad de la pasta de cemento (menor deformación). Los áridos se clasifican en árido fino (arenas y finos) y árido grueso (bolón, grava y gravilla). [7]

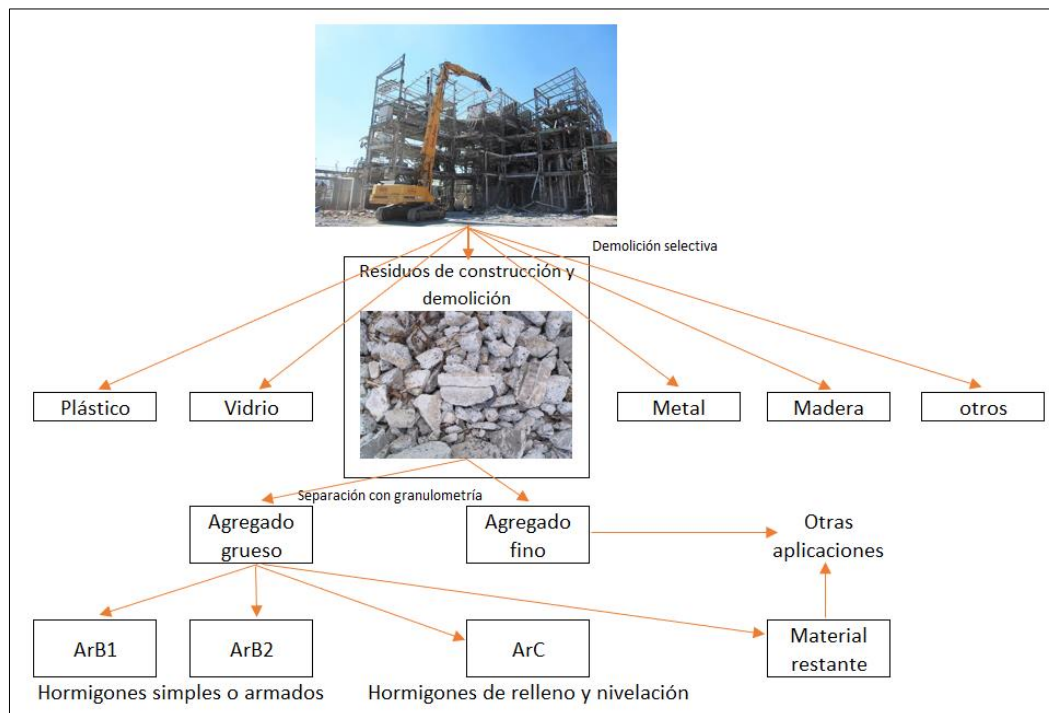
**Tabla 1: Clasificación de áridos según tamaño**

Denominación	Tamaños [mm]	Más utilizados [mm]
<b>Bolón</b>	107,6-250,0	-
<b>Piedra</b>	76,1-107,6	-
<b>Grava</b>	19,0-76,1	19,0-40,0
<b>Gravilla</b>	4,8-19,0	4,8-19,0
<b>Arena</b>	0,08-4,8	0,08-4,8

### 3.4 Agregados Reciclados según la Norma Europea EN 12620

Se definirán los Agregados Reciclados según la Norma Europea EN 12620, complementada con la especificación LNEC E471-2009. [19]

Se disponen de los residuos de demolición y construcción preferiblemente selectivas (estructura sólo de un material), entre estos residuos se encuentran diferentes materiales como plástico, vidrio, hormigón, metal, etc. Tomando el residuo y separándolo en fracciones granulométricas se puede obtener agregado grueso y agregado fino, donde del agregado grueso se pueden obtener cuatro tipos de árido, ArB1, ArB2, ArC o material restante. En el siguiente esquema se puede observar de mejor forma esta clasificación.



**Ilustración 2: Esquema de clasificación de residuos**

En la imagen, las clasificaciones ArB1 y ArB2 son para hormigón estructural simple o armado y el ArC para hormigones de relleno y nivelación. En la presente memoria sólo se trabajará con las primeras dos clasificaciones.

Los áridos reciclados de las clases ArB1 y ArB2 se pueden utilizar en la fabricación de hormigón para su aplicación en hormigón no armado o elementos de hormigón armado. Para aplicaciones en hormigón armado, la proporción máxima de agregados de concreto reciclado es de 25% para agregados de clase ArB1 y 20% para agregados de clase ArB2. Para hormigón no armado, relleno o nivelación, en condiciones ambientales no agresivas, el porcentaje de incorporación no está sujeto a ningún límite.

En Anexo 1 se adjuntan las tablas de la norma EN 12620.

## 4 Normas Europeas

Las Normas Europeas son definidas por el Comité Europeo de Normalización CEN y el Comité Técnico (TC). Los Comités Técnicos son creados por el Consejo Técnico (BT), con títulos y alcances precisos, para preparar los entregables del CEN.

La Norma Europea sobre reciclaje de escombros de hormigón, conocida como EN 12620, nació como una respuesta a la necesidad de establecer criterios técnicos y de calidad para el uso de los agregados reciclados de hormigón en la construcción. El proceso de elaboración de la norma comenzó en la década de 1990, cuando varios países europeos comenzaron a promover el reciclaje de los escombros de construcción y demolición, incluyendo los escombros de hormigón. Sin embargo, se detectó que existían diferencias significativas en los criterios técnicos y de calidad utilizados por cada país, lo que dificultaba la creación de un mercado común para los agregados reciclados de hormigón. [26]

Para abordar esta situación, en el año 2000 se creó el Comité Europeo de Normalización (CEN, por sus siglas en inglés), con el objetivo de desarrollar una Norma Europea armonizada para los agregados reciclados de hormigón. El proceso de elaboración de la norma contó con la participación de expertos de varios países europeos, representantes de la industria, organizaciones de consumidores y autoridades.

Finalmente, en el año 2002, se publicó la norma EN 12620, que establece los criterios técnicos y de calidad para los agregados reciclados de hormigón utilizados en la construcción. La norma establece requisitos para la composición química, la granulometría, la resistencia mecánica y otras propiedades de los agregados reciclados, con el objetivo de asegurar que sean adecuados para su uso en la construcción de nuevas estructuras. La norma EN 12620 ha sido adoptada por varios países europeos y ha contribuido a promover la reutilización de los escombros de hormigón en la construcción, reducir la cantidad de residuos de construcción y demolición y fomentar una economía circular en el sector.

El inicio del reciclaje de residuos de construcción y demolición como meta a futuro nace cuando se publica la decisión de la Directiva 2008/98/ce del parlamento europeo y del consejo sobre los residuos el 19 de noviembre de 2008, la que establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso. En el párrafo 2 del artículo 11 estipula que «*los Estados miembros adoptarán las medidas necesarias para lograr en 2020 un mínimo del 70% (en peso) de desechos no peligrosos de construcción y demolición [...]»*. [26]

## 5 Estado del arte

En este capítulo se presentará una comparación del avance en Europa y en específico de Portugal, y situación en Europa y en Chile.

El "Relatório Anual de Resíduos - 2021" es un informe publicado por la *Agência Portuguesa do Ambiente (APA)* que proporciona información sobre la generación, tratamiento y eliminación de residuos en Portugal en 2020, incluidos los residuos de construcción y demolición. El informe indica que en 2020 se generaron alrededor de 1,4 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición en Portugal, lo que representa alrededor del 10% del total de residuos generados en el país. Además, se estima que el hormigón representa alrededor del 45% de la cantidad total de residuos de construcción y demolición generados en Portugal. [30]

La tasa de reciclaje de residuos de construcción y demolición en Portugal en 2020 fue del 63%, lo que representa un aumento del 3% en comparación con el año anterior. Además, el 32% de los residuos de construcción y demolición se destinaron a la recuperación de terrenos y el 5% se destinó a otros usos, como la producción de agregados reciclados. [30]

La tasa de reutilización de residuos de hormigón en la Unión Europea (UE) varía de un país a otro y depende de diversos factores, como la legislación, las infraestructuras disponibles, las prácticas de gestión de residuos y la demanda del mercado. Según el "Informe Anual de Residuos" de la Comisión Europea para el año 2020, la tasa de reciclaje de residuos de construcción y demolición en la UE fue del 79% en 2018, lo que indica que una gran cantidad de residuos de hormigón se están reciclando en la UE. Sin embargo, no hay datos disponibles sobre el porcentaje específico de reutilización de residuos de hormigón en la UE. La tasa de reciclaje, por su parte, puede variar significativamente entre países. Por ejemplo, algunos países de Europa como Alemania, Austria, Países Bajos y Bélgica tienen tasas de reciclaje de residuos de hormigón superiores al 90%, mientras que otros países como Grecia, Italia y Polonia tienen tasas de reciclaje más bajas, en torno al 20-30%. [31]

En Chile, aún no existe el reciclaje de hormigón como normativa. En 2021 fue publicada la Hoja de Ruta de Economía Circular, instrumento de planificación a largo plazo para transitar hacia una economía circular, con una visión que va mucho más allá del mero reciclaje y que se replantea el actual modelo de producción y consumo. Este estudio se suma a la "Hoja de Ruta RCD Economía Circular en Construcción" y la "Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos Chile 2040" presentadas en 2020.

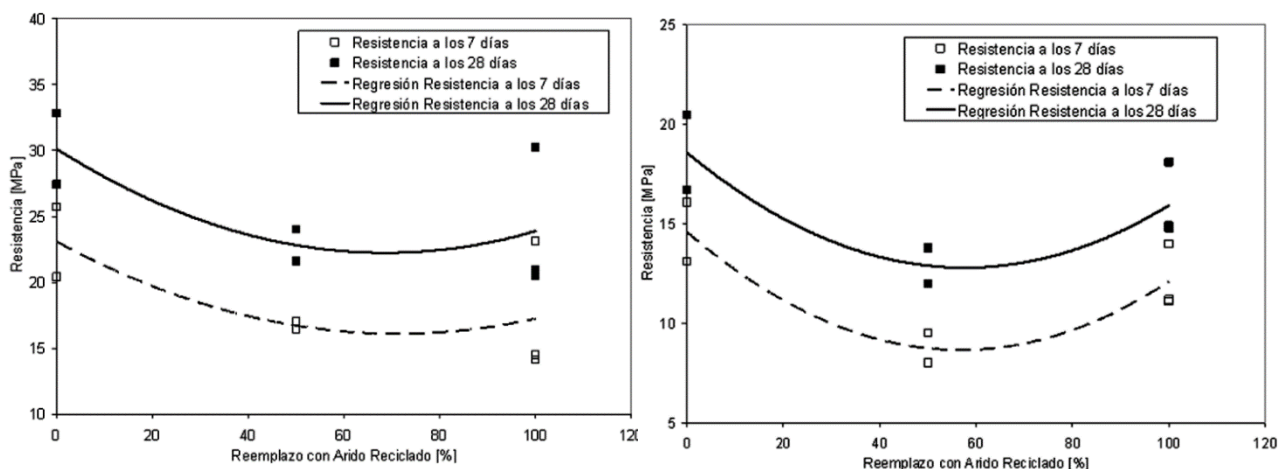
Además, a la fecha, se está actualizando la norma Chilena "NCh163: Áridos para Morteros y Hormigones – Requisitos Generales.", la que permitiría aceptar, en un principio, 5% de árido reciclado, proveniente de hormigones. [32]

## 5.1 Estudios realizados en Chile

A pesar de que los estudios sobre reutilización de RCD han sido bastantes, son pocos los que se han enfocado en la dosificación de los áridos reutilizados para lograr la fabricación de un hormigón que no pierda sus propiedades. Algunos de estos estudios se mencionan a continuación.

En el año 2005, Carlos Aguilar, María Pía Muñoz, Oscar Loyola realizan el estudio “UTILIZACIÓN DEL HORMIGÓN RECICLADO COMO MATERIAL DE REEMPLAZO DE ÁRIDO GRUESO PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES” [27] la que tuvo como objetivo principal analizar las propiedades de hormigones fabricados con áridos reciclados obtenidos de hormigones demolidos para ser propuestos como una alternativa a una potencial escasez de áridos naturales en cercanías a las grandes zonas urbanas. Este estudio analizó el efecto sobre las propiedades del hormigón de la clase y dosis de cemento, así como también, la cantidad y tipo de árido reciclado utilizado en la mezcla. Los resultados de este estudio indican que no se conservó la resistencia del hormigón, disminuyendo al aumentar el porcentaje de árido reciclado. También, indicó una elevada absorción de el árido grueso reciclado.

Los resultados gráficos de este estudio fueron los siguientes:

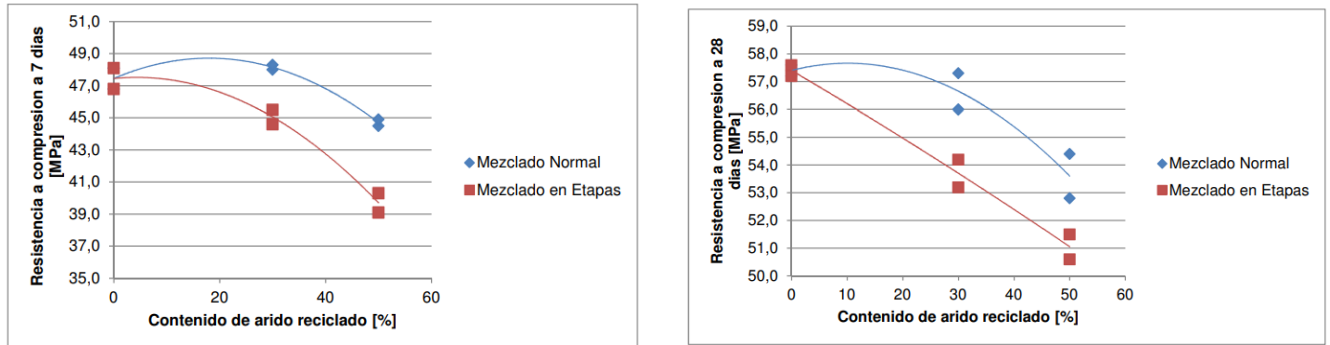


**Ilustración 3: Resultados Experimento 2005**

*“Los hormigones elaborados a partir de áridos reciclados presentaron valores de resistencia a compresión disminuidos respecto de los alcanzados por los hormigones tradicionales. Esta pérdida de resistencia se vio influenciada principalmente por dos factores: por el porcentaje de árido de hormigón reciclado que reemplazó al árido grueso natural y por el tipo de árido utilizado en la confección de las mezclas.”*



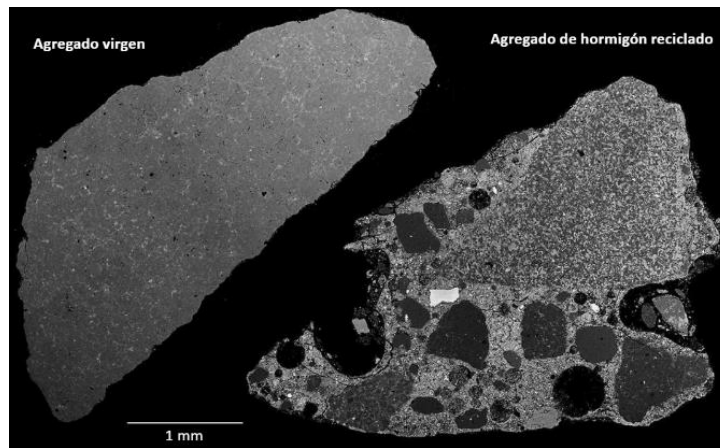
En el año 2011, la estudiante Julie Anne Chauveinc realiza la memoria “*ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE HORMIGONES CON ÁRIDO RECICLADO MEDIANTE LA MODIFICACIÓN DEL MÉTODO DE MEZCLADO DEL HORMIGÓN*” cuyo procedimiento fue elaborar hormigones con 0%, 30%, y 50% de árido reciclado grueso mediante dos métodos de mezclado donde se obtuvo los siguientes resultados de resistencia:



**Ilustración 4: Resultados estudio 2011**

“Comparando las resistencias a compresión a 4, 7 y 28 días, se concluye lo siguiente: como se esperaba, mientras más alto el contenido de árido reciclado, más baja la resistencia a compresión”. Para efectos de comparación entre estudios no se considerará los efectos de la mezcla por etapas que realizó la autora debido a que, en términos generales, no mejoró la resistencia final de los hormigones.

En 2020, el profesor de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Universidad Católica (UC), Ricardo Serpell, concluye un estudio que permitiría revalorizar los desechos de la construcción y demolición que son depositados en su mayoría en los vertederos ilegales del país. El profesor realiza en 2020 un seminario de Arquitectura en Hormigón donde presenta soluciones para la revalorización de los RCD proponiendo diversas soluciones dadas respectivos problemas a la sostenibilidad de los hormigones [29]. En primer lugar, menciona el problema de la durabilidad y agrietamiento, lo que provoca la corrosión en los hormigones armados. Para este problema propone el auto sanado biológico de las grietas. Asimismo, propone soluciones al agrietamiento térmico mediante el agregado de sustitutos a la mezcla. En el caso de la reutilización de hormigón propone lo siguiente.



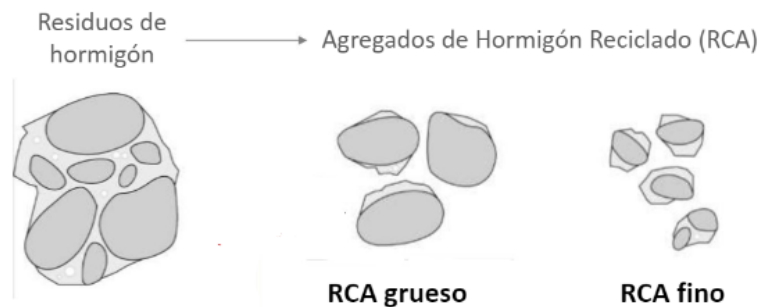
**Ilustración 5: Microfotografía SEM BSEI (Serpell, 2011)**

En primer lugar, analiza la forma del árido residual, indicada en la imagen anterior. En ella se observa la porosidad del agregado de hormigón reciclado. Posteriormente, analiza el agregado luego de ser triturado, el que se convierte en agregado grueso y agregado fino.

Según lo mencionado por Serpell, el agregado grueso presenta los siguientes problemas:

- Menor densidad
- Mayor absorción
- Mayor friabilidad<sup>1</sup>
- Menor trabajabilidad
- Menor resistencia
- Menor módulo de elasticidad

Para los agregados finos estos problemas son mucho mayores.



**Ilustración 6: Esquema Agregados Reciclados**

Siendo esta la forma de los residuos donde el RCA fino tiene mayor proporción de residuo de pasta adherida a su superficie en comparación con el RCA grueso. Se concluye que mientras

<sup>1</sup> Se refiere a la facilidad con la que el hormigón se desmorona o se rompe en pedazos. Es una medida de la resistencia del hormigón a la abrasión y al desgaste, y está influenciada por varios factores, como la calidad de los materiales utilizados para hacer el hormigón, la relación agua-cemento, el tiempo de curado y el proceso de mezclado.

mayor sea esta pasta adherida, mayor son los problemas relacionados al árido. El profesor Serpell propone soluciones para los agregados finos, donde indica que pueden ser utilizados para el desarrollo de materiales de baja resistencia controlada y para el desarrollo de Materiales Cementicios Reactivados. En este seminario no se proponen soluciones al agregado grueso.

## **5.2 Hoja de Ruta Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y Economía Circular en Construcción 2035**

También en el año 2020, se propone la Hoja de Ruta Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y Economía Circular en Construcción 2035, cuyo objetivo es abordar desde el Estado, la reducción de extracción de materias primas y generación de RCD, a partir del uso eficiente de los recursos, y el manejo jerarquizado y ambientalmente racional de los residuos, fomentando la economía circular y la disminución de emisiones del sector construcción (Construye 2025, 2020 b), establece como meta al 2025 que al menos el 15% de los materiales y sistemas constructivos cuenten con certificación de atributos circulares, aumentando dicho porcentaje a un 50% al 2035. Específicamente, las metas más relevantes de la Hoja de Ruta para el 2035 son las siguientes:

- Eje 1: Establecer instrumentos que fomenten la economía circular y uso eficiente de los recursos en las actividades productivas que se llevan a cabo en la región.
- Eje 2: El 50% de la edificación e infraestructura pública nueva de Chile cuenta con criterios y atributos circulares, acreditados a través de certificaciones. (lo mencionado anteriormente).
- Eje 3: A nivel nacional, el 40% de la oferta de materiales, productos, piezas y componentes para la construcción cuenta con atributos circulares.
- Eje 4: El país cuenta con plataformas de trazabilidad de materiales y residuos para la economía circular del sector construcción.
- Eje 5: El país cuenta con programas a nivel regional para la remediación, restauración y mitigación de los riesgos generados por la extracción ilegal de áridos y disposición inadecuada de RCD.

Cada eje presenta sus líneas de acción y submetas a 2025 y 2035 junto con sus planificaciones.

El desarrollo de esta hoja de ruta ha sido liderado por el Comité Consultivo Público conformado por los ministerios de Vivienda y Urbanismo, Medio Ambiente, Obras Públicas, Corfo y Construye 2025, con la participación de grupos de trabajo vinculados a estas instituciones, como las comisiones regionales del Convenio Interministerial de la Estrategia Nacional de Construcción Sustentable (CS), Seremis del Medio Ambiente y el Comité Gestor de Gestión RCD y Economía Circular de Construye 2025, con una amplia participación del sector privado y la academia.

En cuanto al apoyo internacional a la iniciativa, destaca la invitación de la Asociación RCD de España al Congreso Internacional de Economía Circular de la Construcción, llevado a cabo en Madrid en 2019 y en especial, el apoyo brindado por la Embajada de Francia y su Consejero de Desarrollo Sostenible para el Cono Sur, quien articuló una serie de reuniones en París (2019) con actores públicos y privados, entre ellos, el Ministerio de Transición Ecológica y Solidaridad, el

Centro de Estudios Técnicos sobre los Riesgos, Medio Ambiente, Movilidad y Ordenación del Territorio (Cerema), la Federación de Edificación Francesa (FFB), el Instituto de Economía Circular, el Centro de Ciencias y Técnicas de Edificación (CSTB) y el eco organismo Démoclès, entidad compuesta por actores del sector público y privado. Además, se realizaron visitas a plantas de valorización de residuos, áridos reciclados, y el Municipio de Miajadas, en España y Francia.

### 5.2.1 Actualizaciones y avances

Uno de los avances publicados en Construye 2025 es la apertura de la primera planta de valorizaciones de residuos de la construcción en Chile en 2021 a manos de la pyme “Revaloriza”. Esta apertura considera un caso de éxito y brinda una respuesta a la meta de tener infraestructura sostenible para procesar RCD en todas las regiones del país a 2035. Esta pretendía reciclar y valorizar 120.000 toneladas de RCD procedentes de la región de Valparaíso al año 2023 (actual). Esta empresa tratará todos los residuos obtenidos en construcciones y demoliciones y no sólo los residuos de hormigón. En cuanto a estos últimos, la empresa menciona lo siguiente:

*“...la planta, en una primera parte, separará los materiales contenidos en los RCD hasta llegar al hormigón, transformarlo en árido reciclado y reinsertarlo en un nuevo ciclo constructivo, no en la estructura en sí, sino como base estabilizada o en infraestructura donde no se necesita gran resistencia como el mobiliario urbano...”*

En 2022, Construye 2025, ICH y Revaloriza colaboran para lanzar el primer Acuerdo de Producción Limpia (APL), liderado por la CChC donde se están generando avances en torno a la economía circular. La coordinadora de Sustentabilidad de Construye 2025 presentó casos del sector público en la materia y las posibilidades que existen desde el Estado de hacer un uso más eficiente de los recursos, a través de un proyecto de innovación que hizo la Dirección de Vialidad del MOP en la región de Valparaíso, el que consideró el reciclaje de residuos de pavimentos asfálticos antiguos. Además, la especialista en sustentabilidad mostró el caso del Aeródromo de Tobalaba, que disminuye en 70% la cantidad de áridos vírgenes, lo que se tradujo también en la reducción de transporte.

Una solución implementada por las plantas de reciclaje de RCD son el desarrollo de un fertilizante de silicato de calcio, que permite la corrección de suelos ácidos, otra solución es la implementación de áridos reciclados en el pavimento.

En octubre de 2022, la agencia de innovación IUS en alianza con Reviste y el patrocinio de Construye 2025 desarrollan un Programa de Formación Digital que permitirá apoyar el proceso de transformación cultural del sector construcción en el ámbito de la gestión de residuos, contribuyendo de esta manera a los desafíos planteados en la Hoja de Ruta RCD y en específico en el eje transversal de formación. Los cursos dados para la Formación Digital están disponibles para capacitar a las empresas constructoras que lo soliciten. Esta iniciativa permite habilitar capacidades y competencias laborales en el ecosistema y cadena de valor para el desarrollo de proveedores de servicios y productos, y habilitar la economía circular en construcción.

De esta sección se rescata que, en primer lugar, no se ha llegado a encontrar la dosis de Árido Reciclado Grueso que permita que el hormigón no pierda resistencia a pesar de que se encuentren soluciones diferentes como la ocupación de estos en estructuras de baja resistencia o pavimentos. Además, se destaca la disposición a avanzar en este plano en la Hoja de Ruta mediante la creación de plantas de reciclaje y la creación de programas de capacitación de trabajadores constructores para crear la fomentación de la aplicación de los lineamientos dispuestos en la Hoja de Ruta.

Luego del análisis de estos estudios anteriores se propone la implementación de la Norma Europea EN 12620, con su especificación E 471 -2009, y la norma EN 933, las que solucionan la cantidad máxima de árido reciclado grueso en un hormigón para que esta no pierda resistencia.

## 6 Metodología de clasificación para reutilización de residuos según Norma Europea EN 12620

En el presente capítulo se presenta la metodología paso a paso para la clasificación de áridos desechados para determinar el porcentaje máximo de árido reciclado a agregar en una mezcla de hormigón.

### 6.1 Obtención y separación de las muestras

El primer paso a realizar es la obtención de la muestra, para producir una porción de prueba de masa mínima indicada en la tabla 2 según la Norma Europea EN 12620.

Tabla 2: Porción mínima para la prueba

Tamaño D máximo del agregado [mm]	Porción mínima de masa para la prueba [kg]
63	50
32 o menos	20

Se seca la muestra a  $40\pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta obtener masa constante. Pesar y registrar la masa seca de la muestra como M0. En ausencia de componentes sensibles a la temperatura tales como mezclas bituminosas, la muestra puede secarse a  $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Se debe registrar la temperatura de secado T. Se debe tamizar la muestra en los tamices de prueba, la separación completa de partículas mayores a 4 mm. Se debe pesar y registrar la masa de partículas retenidas en el tamiz de 63 mm como M63 y desecharlas. Las partículas que pasan por el tamiz de 4 mm también deben ser pesadas, registradas como M4 y desechadas. La masa obtenida después de estos pasos debe registrarse como M1. [20]

Tabla 3: Masa mínima para M1

Tamaño D máximo del agregado [mm]	Masa mínima [kg]
63	50
32	10
20	4
16	2
14	1
8	0,5

Luego, se debe separar y retener la arcilla y la tierra de la porción de prueba y colocarla en una bandeja. El resto de la muestra se debe sumergir en un tanque de agua para lavar las partículas

y liberar las flotantes. El volumen de las partículas flotantes debe registrarse como VFL [cm<sup>3</sup>]. Con las partículas no flotantes se debe hacer lo siguiente; recogerlas y secarlas a la misma temperatura anterior para obtener una masa constante. Estas partículas se deben esparcir en una superficie plana y separar a mano los constituyentes indicados en la tabla 4 y registrar sus masas y masas combinadas. [20]

**Tabla 4: Constituyentes**

<b>Constituyente</b>	<b>Descripción</b>
<b>Rc</b>	Hormigón, productos de hormigón, mortero Bloques de hormigón para mampostería
<b>Ru</b>	Áridos sueltos, piedra Natural Agregados tratados con ligantes hidráulicos
<b>Rb</b>	Elementos de mampostería cerámica (ej. ladrillos y tejas) Bloques de mampostería de piedra caliza-sílice Hormigón de sótano no flotante
<b>Ra</b>	Materiales bituminosos
<b>Rg</b>	Vidrio
<b>X</b>	Otros: Materiales cohesivos (es decir, arcilla y tierra) Varios: metales (ferrosos y no ferrosos) ferroso), madera no flotante, plástico y caucho Estuco

Pesar y registrar la masa de las partículas no flotantes que quedan por clasificar como M3. Pesar y registrar las masas de cada constituyente como MRc, MRu, MRb, MRa y MRg.

Luego obtener los porcentajes de la siguiente manera:

- $Fl(cm^3/kg) = 1000 \times VFL/M1$
- $X (\%) = 100 \times Mx/M1$
- $Rc (\%) = 100 \times (M2/M1) \times (MRc/M3)$
- $Ru (\%) = 100 \times (M2/M1) \times (MRu/M3)$
- $Rb (\%) = 100 \times (M2/M1) \times (MRb/M3)$
- $Ra (\%) = 100 \times (M2/M1) \times (MRa/M3)$
- $Rg (\%) = 100 \times (M2/M1) \times (MRg/M3)$

## 6.2 Clasificación del Árido Reciclado

Con la cantidad de porcentajes obtenidos se procede a definir a qué tipo corresponde el árido [19]

**Tabla 5: Clasificación del árido reciclado según EN 12620:2002**

Tipo	Proporción de los constituyentes					
	Rc (%)	Rc + Ru (%)	Rb (%)	Ra (%)	X+Rg (%)	FL (%)
ArB1		$\geq 90$	$\geq 10$	$\geq 5$	$\geq 0,5$	$\geq 2$
ArB2		$\geq 70$	$\geq 30$	$\geq 5$	$\geq 1$	$\geq 2$
ArC		$\geq 90$		$\geq 10$	$\geq 2$	$\geq 2$

Los áridos reciclados de las clases ArB1 y ArB2 pueden utilizarse en la fabricación de hormigón para su aplicación en elementos de hormigón armado. Para aplicaciones en hormigón armado, la proporción máxima de áridos de hormigón reciclados en el árido total es del **25% para los áridos de clase ArB1 y del 20% para los áridos de clase ArB2.**

Para hormigón no armado, de relleno o nivelación, en ambientes no agresivos el porcentaje de incorporación no está sujeto a ningún límite.

## 6.3 Reducción de la muestra

De acuerdo con la Norma Europea EN 932-2, consiste en dividir usando divisor rotatorio de muestras o divisor de muestra rifle. En el caso de Bottai se realizó división a mano siguiendo la lógica del modo Riffle.

El procedimiento es el siguiente:

- Divisor Riffle: Colocar la muestra en uno de los receptáculos de la caja riffle. Distribuir el material de manera uniforme en toda la longitud del receptáculo. Colocar los otros dos receptáculos en su lugar. Verter la muestra desde el lado largo de la caja del rifle por la línea central de la caja del rifle. La división se hace según el siguiente esquema [20]:



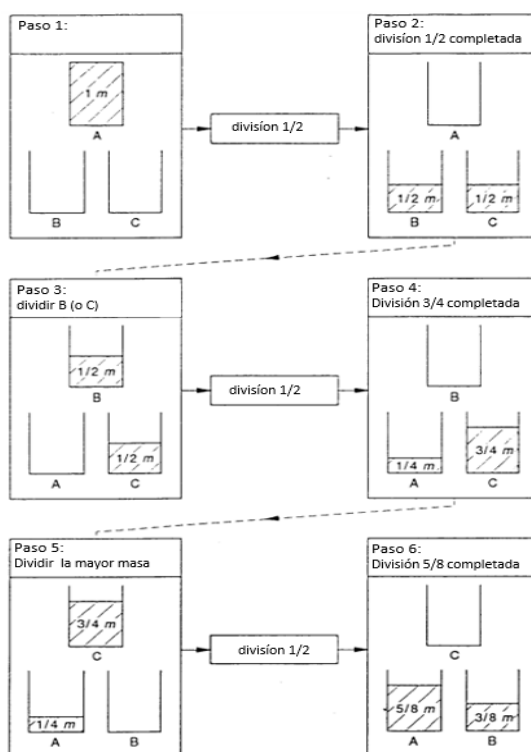


Ilustración 7: Pasos de la división de la muestra en Divisor Riffle según norma EN 932-2

## 7 Metodología para ensayos según normas chilenas

Luego de obtener la clasificación del agregado se procede a realizar los ensayos según la Norma Chilena.

- Determinación de densidades reales y neta y de la absorción de agua de las arenas:** Se define como arena (o árido fino) a todo el material petro que pasa por el tamiz de abertura 4,75[mm] y queda retenido por el tamiz de abertura 0,075[mm]. Este ensayo se realiza con el fin de saber cuánta agua absorbe el árido, y así, posteriormente, saber cuánta agua habrá que agregarle al hormigón para su formación. El procedimiento del ensayo consiste en medir la masa de una muestra de arena, agregar la muestra en un matraz, luego, se vierte agua a aproximadamente 20°C hasta por debajo de la marca, se golpea suavemente para sacar las burbujas del interior y se deja reposar por aproximadamente una hora. Posteriormente, se agrega agua hasta la marca, se vuelve a sacar las burbujas y se deja reposar. Luego se mide la masa del matraz con el agua y la muestra, se saca la muestra, se seca en un horno a 110°C aproximadamente, se enfría y se mide su masa. Además, se llena el matraz sólo con agua hasta la marca y se mide su masa. Estas mediciones permiten, junto con las fórmulas explicitadas en la normativa chilena NCh1239, el cálculo de la densidad real y neta y la absorción de agua de la muestra. [12]

## 7.1 Ensayos de hormigón

Los ensayos son regidos por las normas chilenas NCh163 y NCh170. El hormigón puede ser estudiado en dos fases: cuando se tiene hormigón fresco se pueden realizar los ensayos de determinación de docilidad (método del cono), determinación del contenido de aire y determinación del tiempo de fraguado, y, cuando se tiene hormigón endurecido, se pueden realizar los experimentos de compresión de probetas y de flexo-tracción. [7]

Antes de comenzar con los ensayos se procede a la fabricación del hormigón, se introduce el árido diferenciado en la betonera, en tamaños desde el más fino al más grueso, posterior a esto, mientras la betonera va mezclando, se introduce el cemento paulatinamente. Posteriormente, se comienza a agregar el agua. La cantidad de agua que se agrega tiene que estar estrictamente en los límites permitidos ya que, si se supera, la mezcla no sirve. Las dosificaciones de agua cemento y árido viene determinadas de los ensayos anteriores y las sollicitaciones que se requieren.

### 7.1.1 Hormigón Fresco

- **Determinación de la docilidad:** A través del método del asentamiento del Cono de Abrams es posible determinar el grado de docilidad que tiene el hormigón. Se entiende por docilidad a la facilidad del hormigón fresco para ser transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación. Para realizar el método, se coloca un tercio de muestra en un molde con forma de tronco cónico. Luego, con la ayuda de un pisón (o varilla) se comienza a sacar el aire de entremedio, enterrándolo 25 veces en forma de espiral. Esto se repite tres veces hasta llenar el cono. Se mide y registra el asentamiento del hormigón como la distancia vertical entre la altura original y la posición final del centro de la superficie del hormigón. Todo bajo la normativa chilena NCh1019. [16]
- **Compactación del hormigón:** En base a la norma NCh1017. Luego de realizado los ensayos para hormigón fresco se procede a realizar la compactación del hormigón para su posterior secado. Se vierte la mezcla en moldes (junto con un líquido antiadherente) en forma de cubo, y se somete a una plancha vibratoria para que quede acomodado de forma correcta. Luego, se deja secar para sus posteriores ensayos. [17]
- **Protección y curado:** En base a la norma NCh1017. Antes de someter a la muestra de hormigón endurecido a los ensayos es importante que pasen por la sala de protección y curado. Las probetas serán sumergidas en lo que se llama "piscinas", las cuales contienen agua saturada con Cal. El agua con cal es importante, ya que permite el flujo de agua en una sola dirección (sólo hacia dentro del hormigón). Se deja en las tinas por el tiempo que sea requerido para alcanzar la máxima resistencia del material. [17]

### 7.1.2 Hormigón endurecido

- **Compresión de probetas:** Según la norma NCh1037. Posterior a la etapa de curado, se ensayan las probetas secas en la máquina de compresión, buscando encontrar su punto de falla (ruptura). Estas probetas son medidas, para luego poner una de las caras lisas perpendicular a la compresión de la máquina, la que trabaja a una velocidad lenta, pero de forma continua. [18]

## **8 Ejemplo de aplicación en una planta de construcción en la región metropolitana**

Luego del análisis de los estudios anteriores se propone la implementación de la Norma Europea EN12620 con su especificación E 471-2009 y la norma EN 933. Esta solución a la cantidad máxima de árido reciclado grueso en un hormigón para que esta no pierda resistencia.

Este estudio se llevó a cabo en la planta de prefabricados Bottai en San Bernardo. El laboratorio de calidad y los residuos se encuentra en el mismo lugar que la planta de fabricación por lo que no se considera el transporte de agregados.

Los pasos para obtener los resultados son los mencionados en las secciones Metodología de Clasificación para reutilización de residuos según Norma Europea EN 12620. Y la Metodología para ensayos según normas chilenas.



**Ilustración 8: Planta de prefabricados Bottai**

## 8.1 Estado de los residuos

Antes de comenzar con la toma de la muestra, se presenta el estado de los residuos en la planta. Como se puede apreciar en las siguientes imágenes, dentro de los desechos se encuentran bloques de hormigón de gran tamaño, partes rotas de elementos prefabricados, y partes trituradas de éstas. Además de estas partes de hormigón, se encuentran pedazos de plásticos, y restos de madera.



**Ilustración 9: Estado de los residuos (a)**



**Ilustración 10: Estado de los residuos (b)**



**Ilustración 11: Estado de los residuos (c)**

Debido a que en la empresa no había una máquina trituradora, el residuo usado corresponde a las partes que ya se encuentran trituradas, las que se ven en las imágenes anteriores. Estas partes se recogieron con palas hasta lograr tomar la muestra necesaria para aplicar la metodología.

## **8.2 Aplicación de la metodología**

### **8.2.1 Obtención y separación de las muestras**

Del desecho triturado se obtuvo una muestra de 50 kg de árido desechado (masa mínima según la tabla 2). Esta muestra se secó en horno a 80°C hasta obtener masa constante. Luego se registró como masa M0.



**Ilustración 12: Muestra M0**

Esta muestra fue reducida según la sección 6.3 para luego obtener una submuestra de 7,2 kg cumpliendo con la masa mínima según la tabla 3 de la metodología. Esta submuestra de 7,2 kg corresponde a M1.



**Ilustración 13: Muestra reducida M1**

En la imagen anterior se puede observar de cerca la forma en la que está el árido desechado triturado luego de pasar por el proceso de reducción. Obteniendo esta submuestra, se sigue con la metodología mediante la clasificación de áridos.

### 8.2.2 Clasificación del Árido Reciclado

Siguiendo los pasos de la sección 6.1 y 6.2 se realiza lo siguiente. Se tamiza la muestra para obtener la masa de las partículas menores a 4 mm y mayores a 63 mm, la que corresponde a 11,3 kg. Luego, se vierte agua en la mezcla para obtener las partículas flotantes.



**Ilustración 14: Momento en el que se vierte agua a la muestra**

Para obtener las partículas flotantes, se ve la diferencia de volumen del agua antes y después de verterlas en el matraz, como se ve en las siguientes imágenes.



**Ilustración 15: Obtención de  $V_f$**

Donde el volumen de partículas flotantes  $V_f$  es de 10 cm<sup>3</sup>.

Luego de obtener  $V_f$  y masar los elementos de madera no flotante que se encontraban (0,005 kg), se procede a obtener las masas de  $R_u$  y  $R_b$ , donde, como indica la tabla,  $R_u$  corresponde a material pétreo natural y  $R_b$  a pedazos de hormigón.



En las siguientes imágenes se pueden observar cómo son las clasificaciones. Donde las masas corresponden a 6,595 kg Ru y 0,6 kg Rb.



**Ilustración 16: Clasificación Ru**



**Ilustración 17: Clasificación Rb**

A continuación, se presentan los resultados en tablas resumen.

**Tabla 6: Resultado de masas**

M0	50	kg
M1	7,2	kg
M4+M63	11,3	kg
M2	7,195	kg
MF	0,005	kg
VF	10	cm <sup>3</sup>
M3	7,195	kg

**Tabla 7: Masas de los elementos en kg**

Rc	<b>0,6</b>
Ru	6,595
Rb	0
Ra	0
Rg	0
X	0,005

Ahora, aplicando las siguientes expresiones presentadas en la sección 6.1

- $Fl(\text{cm}^3/\text{kg}) = 1000 \times VFL/M1$

- $X (\%) = 100 \times Mx/M1$
- $Rc (\%) = 100 \times (M2/M1) \times (MRc/M3)$
- $Ru (\%) = 100 \times (M2/M1) \times (MRu/M3)$
- $Rb (\%) = 100 \times (M2/M1) \times (MRb/M3)$
- $Ra (\%) = 100 \times (M2/M1) \times (MRa/M3)$
- $Rg (\%) = 100 \times (M2/M1) \times (MRg/M3)$

Donde los resultados se muestran a continuación.

**Tabla 8: Proporciones de los elementos**

Fl	1388,9	cm <sup>3</sup> /kg
X	0,1	%
Rc	8,3	%
Ru	91,6	%
Rb	0	%
Ra	0	%
Rg	0	%

Con estos resultados y según la tabla 5, la clasificación del árido es ArB1, lo que significa que el máximo árido reciclado que se puede agregar según la Norma Europea EN 12620 es de un **25%**. Sin embargo, debido a los factores de, en primer lugar, no tener una muestra que haya sido triturada en máquina y, en segundo lugar, no haber tenido el divisor de Riffle para realizar la división correcta de la muestra, se procederá a ocupar un máximo de **20%**.

### 8.2.3 Análisis de granulometría

**Tabla 9: Determinación de densidades reales y neta y de la absorción de aguas:**

Peso seco	1334	g
Peso saturado	1398	g
Peso sumergido	850	g
Densidad Neta	2756	kg/m <sup>3</sup>
Densidad real seca	2434	kg/m <sup>3</sup>
Densidad saturada superficie seca	2551	kg/m <sup>3</sup>
Absorción	<b>4,8</b>	<b>%</b>

Siendo la absorción mayor que la de los áridos naturales, que corresponde a 1,1% en los áridos usados en Bottai.

## 8.2.4 Determinación de la dosificación de la mezcla

Del catálogo de productos prefabricados que realiza Bottai se escogió la mezcla para soleras en mesa vibratoria. Esta corresponde a una mezcla seca (cono 0) y su dosificación es la siguiente para 2400 kg.

**Tabla 10: Dosificación Soleras Bottai 2400 Kg**

		<b>Grado horm.</b>	<b>Cemento P400</b>	<b>Gravilla 3/4"</b>	<b>Gravilla 3/8"</b>	<b>Arena industrial</b>	<b>Arena fina BSA</b>	<b>Polvo roca</b>	<b>Agua</b>	<b>Total</b>
			kg	kg	kg	kg		kg	kg	kg
<b>P002</b>	Vibrador mesa: Soleras.	G-30	310	500	330	690		460	110	2400

Esta mezcla ensayada en probetas originales da como resultado en promedio 38,5 MPa de resistencia a los 28 días (Anexo 2). Teniendo esto en cuenta se procede a realizar el experimento.

Para efectos prácticos, esta dosificación se reduce a lo mínimo que se puede agregar a la Betonera Tk2 disponible en la planta, es decir, 300 kg.

**Tabla 11: Dosificación Soleras Bottai 300 Kg**

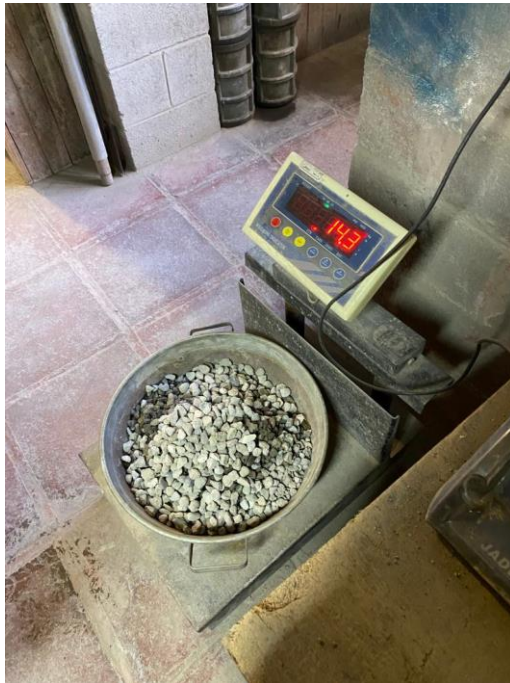
		<b>Grado horm.</b>	<b>Cemento P400</b>	<b>Gravilla 3/4"</b>	<b>Gravilla 3/8"</b>	<b>Arena industrial</b>	<b>Arena fina BSA</b>	<b>Polvo roca</b>	<b>Agua</b>	<b>Total</b>
			kg	kg	kg	kg		kg	kg	kg
<b>P002</b>	Vibrador mesa: Soleras.	G-30	38,75	62,5	41,25	86,25	0	57,5	13,75	300

De esta tabla, los componentes que pueden reemplazarse son el 20% de las gravillas 3/4" y 3/8", así, la nueva tabla de dosificación es la siguiente

**Tabla 12: Dosificación final**

		<b>Grado horm.</b>	<b>Cemento P400</b>	<b>Gravilla 3/4"</b>	<b>Gravilla 3/8"</b>	<b>Arena industrial</b>	<b>Arena fina BSA</b>	<b>Polvo roca</b>	<b>Agua</b>	<b>Total</b>
			kg	kg	kg	kg		kg	kg	kg
<b>P002</b>	Vibrador mesa: Soleras.	G-30	38,75	50	33	86,25		57,5	13,75	279,25
	Reciclado			<b>12,5</b>	<b>8,25</b>				<b>0,12</b>	20,87
	Total		38,75	62,50	41,25	86,25		57,50	13,87	300,12

Debido a la absorción adicional de agua que poseen los áridos reciclados se debe agregar 0,12 kg adicionales de agua en este caso. Tamizando los agregados de RCD se tiene lo siguiente.



**Ilustración 19: Gravilla Reciclada de 3/4"**



**Ilustración 18: Gravilla Reciclada de 3/8"**

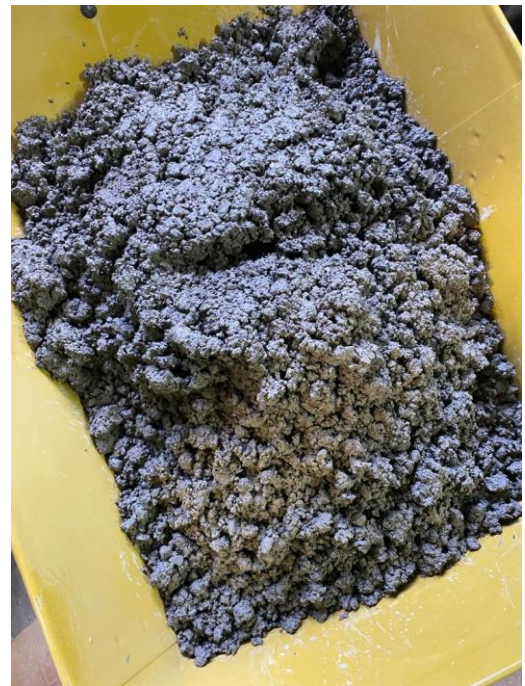
Donde restando 1,8 kg correspondiente a la masa de los recipientes, se obtienen las masas necesarias para la dosificación mostrada en la tabla 12. Luego de esto, se procede a realizar la mezcla en la Betonera que se observa a continuación.



**Ilustración 20: Betonera de la planta Bottai**



**Ilustración 21: Obtención de la Mezcla**



**Ilustración 22: Mezcla final a Ensayar**

Como se puede observar, el hormigón corresponde a una mezcla seca, por lo que no se realiza el asentamiento del cono, ya que corresponde a cono 0 cm.

Teniendo la mezcla lista se procede a realizar la fabricación de probetas y ensayos según las normas chilenas correspondientes.

## 8.2.5 Realización y ensayo de probetas

Se realizan cuatro probetas cilíndricas para ensayar a 7, 14 y 28 días. En las siguientes imágenes se muestra la mesa vibratoria y las probetas resultantes.



**Ilustración 23: Mesa Vibratoria**



**Ilustración 24: Probetas**

Las probetas fueron ensayadas en la siguiente prensa para ensayo a compresión, los resultados se muestran en la tabla 13.



**Ilustración 25: Prensa para Ensayo a Compresión**

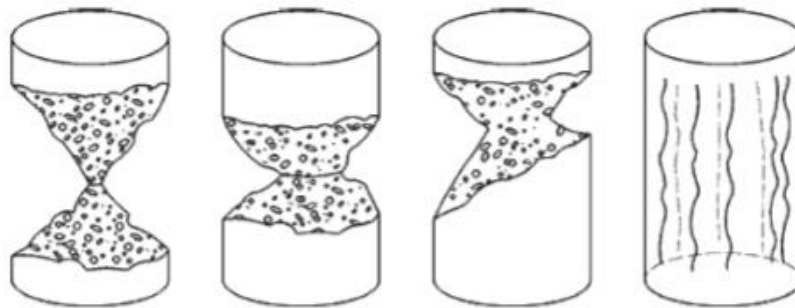
**Tabla 13: Resultados ensayo a compresión (Anexo 3)**

N° de muestra	Fecha de fabricación	Fecha de ensayo	Edad de ensayo	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Área (cm <sup>2</sup> )	Prensa (kgf)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	26-01-2023	02-02-2023	7	30,0	15,0	12666	2389	176,7	8,9	365	20,7
2	26-01-2023	09-02-2023	14	30,1	15,0	12731	2394	176,7	14,2	583	33,0
3	26-01-2023	23-02-2023	28	30,1	15,0	12725	2393	176,7	16,3	669	37,9
4	26-01-2023	23-02-2023	28	30,1	15,0	12728	2393	176,7	16,1	661	37,4

Aquí la resistencia final obtenida es de **37,7 MPa** (promedio de las probetas ensayadas a los 28 días).

Comparando con la mezcla original que posee 38,8 MPa de resistencia (Anexo 2) y que al ser un hormigón G30 se necesita 30 MPa, se concluye que sigue cumpliendo la especificación de resistencia para las soleras fabricadas en Bottai.

Ahora, analizando las roturas de las probetas se tiene lo siguiente. En primer lugar, se presentan las roturas esperadas para el ensayo de probetas a compresión.



**Ilustración 26: Roturas correctas en probetas cilíndricas (NCh 1037)**

A continuación, las fisuras obtenidas en las probetas realizadas son las siguientes.



**Ilustración 27: Roturas en probetas realizadas**



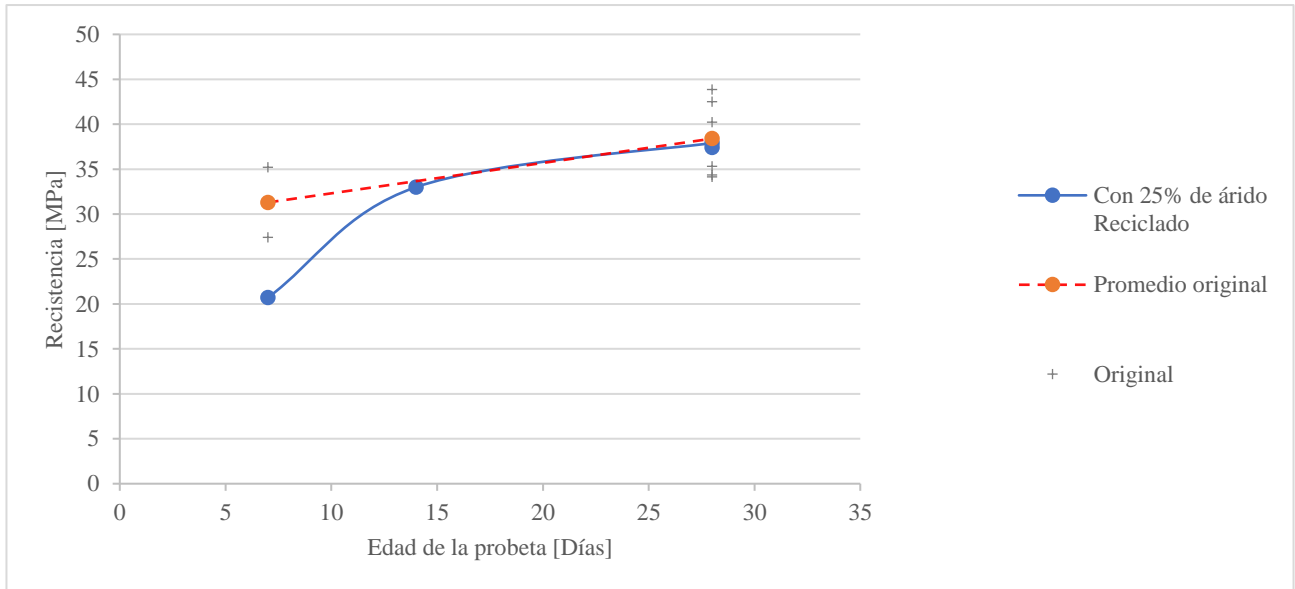
Las roturas corresponden a la de tipo 4, lo que es indicativo de que los ensayos no presentaron anomalías.

### 8.3 Análisis de resultados

En primer lugar, se presentan los datos de la mezcla original, y luego, un gráfico comparativo para los ensayos de compresión del hormigón con árido original vs reciclado.

**Tabla 14: Ensayo compresión árido Virgen (original)**

N° de muestra	Fecha de fabricación	Fecha de ensayo	Edad de ensayo	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Prensa (kgf)	Carga (kN)	Resistencia (MPa)
1	04-09-2022	11-09-2022	7	30,0	15,0	17,67	15,1	484	27,4
2	04-09-2022	02-10-2022	28	30,0	15,0	17,67	17,3	607	34,4
3	04-09-2022	02-10-2022	28	30,0	15,0	17,67	18,9	603	34,1
4	04-09-2022	02-10-2022	28	30,0	15,0	17,67	18,3	624	35,3
5	17-11-2022	24-11-2022	7	30,0	15,0	17,67	11,7	622	35,2
6	17-11-2022	15-12-2022	28	30,0	15,0	17,67	14,8	711	40,2
7	17-11-2022	15-12-2022	28	30,0	15,0	17,67	14,7	775	43,9
8	17-11-2022	15-12-2022	28	30,0	15,0	17,67	15,2	751	42,5



**Ilustración 28: Gráfico comparativo**

En el gráfico se puede observar que, si bien la mezcla con árido reciclado parte a los 7 días con una resistencia baja en comparación con la mezcla de árido virgen, esta llega a la resistencia promedio original a los 28 días. Esto se puede deber al cambio de cantidad de agua a la mezcla

reciclada, que, si bien en un principio puede haber sido mayor y bajado la resistencia, con el paso de los días, la pasta adherida a los áridos reciclados ha absorbido el porcentaje necesario para llegar a la humedad de la mezcla original. Esto comprueba que se debe verificar obligatoriamente la absorción de agua nueva en áridos reciclados y tenerlo en consideración a la hora de realizar la dosificación.

Al haber cumplido con la resistencia final, se verifica que la clasificación del árido realizada según la Norma Europea EN 12620 arrojó un porcentaje adecuado de agregado reciclado para conservar la resistencia, considerando que, según los estudios anteriores, al aumentar la cantidad de árido reciclado disminuye la resistencia.

## **9 Análisis crítico de estudios o proyectos realizados en Chile.**

Realizado el experimento de aplicación de la Norma Europea sobre reutilización de RCD y el buen resultado obtenido, se abre la interrogante de por qué no ha funcionado anteriormente, asimismo, se procede a comparar los estudios anteriores realizados en Chile versus esta norma.

La primera gran diferencia es el porcentaje de árido reutilizado que se ha agregado en las mezclas anteriores. Si se compara con el estudio realizado en 2005, la mínima cantidad de árido reciclado que se aplica es de un 50%, duplicando la máxima cantidad aceptable según la Norma Europea. Esto indica que si se excede la cantidad máxima que indica la norma, los resultados comienzan a fallar. Esto también se comprueba con el estudio que se realizó en 2011, donde el mínimo de árido reciclado agregado a la mezcla fue de un 30%. En los gráficos expuestos en la ilustración 5, donde se muestran los resultados de dicho estudio, se puede notar que al 30% de árido reciclado agregado este sigue cumpliendo con la resistencia de la mezcla original, indicando una disminución de esta al aumentar la cantidad después del 30%.

Siguiendo esta línea, se puede comprobar que, siguiendo estrictamente el criterio de la clasificación de árido reciclado expuesta en la Norma Europea, se puede lograr obtener el correcto porcentaje a utilizar para lograr que no disminuya la resistencia.

Además de esto, en las conclusiones de los estudios anteriores se indica un aumento de absorción de agua de los áridos reciclados, donde, al comprobarlo con el experimento actual, se puede solucionar al agregar un porcentaje proporcional adicional en la muestra, solucionando uno de los grandes problemas.

## **10 Propuesta para aplicar en Chile**

Luego de comprobar que es posible reutilizar los RCD de hormigón, se realiza una propuesta de logística para que se pueda aplicar la construcción circular en la mayor cantidad de obras posible en el país. Para esto se consideran las principales problemáticas que son, la falta de plantas que realicen este procedimiento, el problema de transporte, la barrera económica que hace preferible desechar los residuos a reutilizarlos.

Considerando que este estudio se ha realizado en una empresa que contaba con su propio laboratorio de calidad y que estaba ubicado en el mismo lugar donde se realizaban los prefabricados de hormigón se propone la aplicación de esta directamente en aquellas empresas que cumplan con estas condiciones sin ningún problema.

En caso de que la empresa no posea estas cualidades se propone la creación de una planta que se encargue de la molienda de residuos de hormigón, la tamización del árido a reutilizar y la clasificación de árido según la Norma Europea EN 12620. Considerando los casos de éxito de plantas de reciclaje de escombros en Valparaíso y Concepción esta opción se vuelve viable.

### **10.1 Análisis crítico y recomendaciones**

Si se crea una planta de molienda y clasificación de áridos reciclados se debe considerar que mientras más lejos esté de la construcción o demolición, los costos de transporte de escombros serán mayores por lo que se debiese considerar la creación de esta en varias partes del país.

Ahora, como se prefiere ahorrar llegando a no utilizar vertederos legales en la actualidad se crea un problema de fiscalización a las empresas constructoras. Por esta razón si se crearan plantas de reciclaje de hormigón, la factibilidad de que las empresas llevaran sus residuos a estas sería incierta.

Una solución a esto sería que las empresas de reciclaje de hormigón tuviesen su propio transporte para ir a buscar los residuos a las plantas, de forma que estas últimas no lo vean como un gasto adicional. Otra solución al respecto es la implementación de una ley que obligue a las empresas a reciclar sus escombros y a utilizar un porcentaje de árido reciclado, teniendo en cuenta que deben existir fiscalizaciones constantes.

## 11 Conclusión

El presente estudio de la aplicación de la Norma Europea EN 12620 sobre la reutilización Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como agregado grueso para la fabricación de hormigón estructural en Chile cumple con evaluar la posibilidad de implementar una metodología para la reducción de desechos de construcción para ser usados bajo condiciones establecidas en la norma EN 12620, como Agregados Gruesos en la confección de hormigón. Para poder contar con una primera apreciación a este objetivo de implementación de esta metodología en Chile.

Se tiene que los estudios anteriores enfocados en la dosificación correcta del hormigón con árido reciclado, si bien concluyeron que a mayor cantidad de árido reciclado se agrega a la muestra menor es su resistencia y que también tienen una mayor absorción, no se realizó la búsqueda de cuánto es el máximo que se le debe agregar para que siga cumpliendo con su resistencia, ensayando sólo 30% 50% y 100% de árido reciclado. Este problema lo soluciona la Norma Europea, la que, mediante la clasificación de los RCD, indica cuánto es el máximo de árido reciclado que se puede agregar a una mezcla de hormigón. Esta indica que, en condiciones ideales, donde los RCD de hormigón no estén contaminados ni estén combinados con plástico, madera, u otros materiales, lo máximo que se le puede agregar es un 25%. Además, al saber las conclusiones de los estudios anteriores sobre el aumento de la absorción de humedad en áridos reciclados, se tuvo en consideración para realizar el experimento, realizando el cálculo del aumento de absorción para poder agregar el agua adicional necesaria, y así mantener la humedad de la mezcla original.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este estudio se recomienda a futuro lo siguiente; seguir al pie la clasificación de residuos descrita en la norma EN 12620 debido a que define un correcto porcentaje de máximo agregado grueso reciclado, realizar otro estudio con más ensayos que pueda confirmar que siempre funciona aumentar la cantidad de agua en proporción con la absorción. Esto debido a que en el presente estudio sólo se ensaya una mezcla de cono 0, y con residuos en condiciones ideales, por lo que los resultados pueden estar sesgados.

El estudio realizado en el presente documento puede lograr ser parte de las distintas medidas que se han implementado en Chile en los últimos años tal como la Hoja de Ruta Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y Economía Circular en Construcción 2035. Además de la nueva actualización de la norma NCh163 Áridos para Morteros y Hormigones – Requisitos Generales, esto implica un impacto del trabajo realizado al resumir la situación Chilena en cuanto al hormigón reciclado, junto con esto, se abre la posibilidad de implementar un plan de aplicación de la norma en Chile según las disposiciones de cada planta, dejando el camino abierto para que futuros estudios puedan concluir otras propuestas de aplicación de esta norma, y así, lograr la Construcción Circular en Chile.

## 12 Bibliografía

[1] Arthur H. Nilson, David Darwin, Charles Dolan (2017), “*Design of Concrete Structures*” 14th Edition.

[2] Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. (2006). “*Concrete: Microstructure, properties, and materials*”. Mc Graw Hill, 3 Edition.

[3] Walter Stahel, 2019. *The Circular Economy, A User’s Guide*. New York: Routledge. ISBN 978-0-367-20014-5

[5] Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2040

[6] Sexto Reporte del Estado del Medio Ambiente (2021)

[7] Donoso, Eduardo y Díaz, Gerardo, *Curso de Materiales de Construcción, Cuaderno de Trabajo*, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018.

[8] Norma Europea EN 12620: Áridos para hormigón.

[9] Norma Chilena oficial NCh 163. Áridos para morteros y hormigones - Requisitos generales.

[10] Norma Chilena oficial NCh 165. Áridos para Morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría.

[11] Norma Chilena oficial NCh 1223. Áridos para morteros y hormigones - Determinación del material fino menor a 0,080 mm.

[12] Norma Chilena oficial NCh 1239. Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas.

[13] Norma Chilena oficial NCh 1369. Áridos - Determinación de la resistencia al desgaste por abrasión e impacto.

[14] Norma Chilena oficial NCh 1325. Áridos - Determinación del equivalente de arena en suelo y áridos finos.

[15] Norma Chilena oficial NCh 170. Hormigones de cemento - Especificaciones.

[16] Norma Chilena oficial NCh 1019 Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams.

[17] Norma Chilena oficial NCh 1017 Hormigón - Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento.

[18] Norma Chilena oficial NCh 1037 Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.

[19] GUIA PARA A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS GROSSOS EMBETÕES  
Traducción por Joana Sousa Coutinho Set 2021 (L.EC-M.EC, FEUP)

[20] Norma Europea EN 933 Pruebas para generales propiedades de agregados.

[21] Ellen MacArthur Foundation; Towards The Circular Economy. Economic and business rationale for an accelerated transition, 2013  
Torgal, F.P. & Jalali ; A Sustentabilidade dos Materiais de Construção, TecMinho, 2010

[22] Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati S. ; A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, Journal of Cleaner Production, v. 114, 2016

[23] Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M ; Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, Resources, Conservation & Recycling, v. 127, 2017  
Prestom, A. ; A Global Redesign? Shaping the Circular Economy, Chatham House, 2012

[24] Ministerio del medio ambiente; HOJA DE RUTA PARA UN CHILE CIRCULAR AL 2040, 2021 (<https://economycircual.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/07/HOJA-DE-RUTA-PARA-UN-CHILE-CIRCULAR-AL-2040-ES-VERSION-COMPLETA.pdf>)

[25] Ministerio del medio ambiente; Sexto reporte del Estado del Medio Ambiente; 2021 (<https://sinia.mma.gob.cl/index.php/rema-2021/>)

[26] Waste Framework Directive (2008/98/EC)

[27] Carlos Aguilar\*, María Pía Muñoz\*, Oscar Loyola\* (2005) Utilización del hormigón reciclado como material de reemplazo de árido grueso para la fabricación de hormigones. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 20 No 1, °

[28] Julie Anne Chauveinc (2011) *Estudio experimental de propiedades mecánicas de hormigones con árido reciclado mediante la modificación del método de mezclado del hormigón*. Memoria para optar al título de ingeniero civil.

[29] Ricardo Serpell (2020), *Seminario arquitectura en hormigón, investigación e innovación*, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile ICH

[30] Agência Portuguesa do Ambiente (APA) *Relatório Anual de Resíduos - 2021*

[31] Comisión Europea (2020) *Informe Anual de Residuos*

[32] Dr Marcos A Díaz Gonzalez (2022) *Uso de áridos reciclados para pavimentos de hormigón*. El mercurio



## Anexo A

Se presentan tablas rescatadas de: GUIA PARA A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS GROSSOS EM BETÕES traducido al inglés por Joana Sousa Coutinho profesora de Construcción Circular FEUP, Portugal.

TABLE 1  
Classification of coarse recycled aggregates

Class	Proportion of Constituents (EN 12620:2002/A1:2008))					
	R <sub>c</sub> (%)	R <sub>c</sub> + R <sub>u</sub> (%)	R <sub>b</sub> (%)	R <sub>a</sub> (%)	X + R <sub>g</sub> (%)	FL (%)
ARB1		≥ 90	≤ 10	≤ 5	≤ 0,5	≤ 2
ARB2		≥ 70	≤ 30	≤ 5	≤ 1	≤ 2
ARC		≥ 90		≤ 10	≤ 2	≤ 2

Constituent	Description
R <sub>c</sub>	Concrete, concrete products, mortar Concrete masonry units
R <sub>u</sub>	Unbound aggregate, natural stone Hydraulically bound aggregate
R <sub>b</sub>	Clay masonry units (i.e. bricks and tiles) Calcium silicate masonry units Aerated non-floating concrete
R <sub>a</sub>	Bituminous materials
R <sub>g</sub>	Glass
X	Other: Cohesive (i.e. clay and soil) Miscellaneous: metals (ferrous and non-ferrous), non-floating wood, plastic and rubber Gypsum plaster

FL Floating particles (by volume)

Ilustración 29: Tabla de clasificación de áridos rescatada de la norma EN 12620

Example of a test data sheet

EN 933-11	Laboratory:
Identification of the sample:	Date:
	Operator:

Water content $w =$	%	Test portion mass for water content $M_w =$	g
---------------------	---	---	---

Test portion mass $M_h =$	kg	Volume of floating particles $V_{FL} =$	cm <sup>3</sup>
---------------------------	----	---	-----------------

$$FL = (100 + w)/100 \times V_{FL} / M_h = \text{cm}^3/\text{kg}$$

**Ilustración 30: Ejemplo de toma de datos según EN 933-11**

EN 933-11	Laboratory:
Identification of the sample:	Date:
	Operator:

Drying temperature $T =$	°C
--------------------------	----

$M_0 =$	g
---------	---

Retained at 63 mm, $M_{63} =$	g
-------------------------------	---

Passing at 4 mm, $M_4 =$	g
--------------------------	---

Test portion mass, $M_1 =$	g
----------------------------	---

Remaining non floating $M_2 =$	g
--------------------------------	---

Reduced remaining non floating $M_3 =$	g
--	---



**Ilustración 31: Continuación ejemplo de toma de datos según EN 933-11**

Constituent	Volume, cm <sup>3</sup>	Proportion, cm <sup>3</sup> /kg
FL	$V_{FL} =$	$1000 \times V_{FL} / M_1 =$


Constituent	Masses, g	Proportions, %
X	$M_X =$	$100 \times M_X / M_1 =$
Rc	$M_{Rc} =$	$100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{Rc} / M_3) =$
Ru	$M_{Ru} =$	$100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{Ru} / M_3) =$
Rb	$M_{Rb} =$	$100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{Rb} / M_3) =$
Ra	$M_{Ra} =$	$100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{Ra} / M_3) =$
Rg	$M_{Rg} =$	$100 \times (M_2 / M_1) \times (M_{Rg} / M_3) =$
		$\sum P =$

Ilustración 32: Continuación ejemplo de toma de datos según EN 933-11

## Anexo B

	<h3>INFORME CONTROL FÁBRICA</h3>				
<p>Fecha de emisión: Jueves 02 de Marzo de 2023</p> <p>Identificación del   Soleras</p> <p>Ciente-Obra:</p> <p>Exigencia a la com  G-30</p> <p>Cantidad de muest 8</p> <p>Observaciones: Se cumple requisitos de resistencia a compresión exigido.</p> <p>Normas de Referencia:</p> <p>NCh - 170/2016 - Hormigón - Requisitos generales.</p> <p>NCh - 1017/2009 - Hormigón, confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y hendimiento</p> <p>NCh - 1171/1/2012 - Hormigón - Testigos de hormigón endurecido - Parte 1 - Extracción y ensayo</p> <p>NCh - 1171/2/2001 - Hormigón - Testigos de hormigón endurecido - Parte 2 - Evaluación de resistencia mecánica</p> <p>NCh - 1172/2010 - Hormigón - Refrentado de probetas</p> <p>NCh - 1037/2009 - Hormigón, ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas</p>					
<p><b>SOLERAS</b></p> <p><b>RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS 15 x 30 cm.</b></p>					
Muestra N°	Probeta N°	Fecha de fabricación	Fecha de ensayo	Edad de ensayo	Compresión individual (Mpa)
1	1	04-09-2022	11-09-2022	7	27,4
2	2	04-09-2022	02-10-2022	28	34,4
3	3	04-09-2022	02-10-2022	28	34,1
4	4	04-09-2022	02-10-2022	28	35,3
5	1	17-11-2022	24-11-2022	7	35,2
6	2	17-11-2022	15-12-2022	28	40,2
7	3	17-11-2022	15-12-2022	28	43,9
8	4	17-11-2022	15-12-2022	28	42,5
 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-top: 10px;"> <p style="margin: 0;">Ignacio Ismael Contreras Castro Encargado de calidad</p> </div>					

## Anexo C

	<h3>INFORME CONTROL FÁBRICA</h3>				
Fecha de emisión:	Jueves 26 de Enero de 2023				
Identificación del	Soleras				
Cliente-Obra:					
Exigencia a la com	G-30				
Cantidad de muest	4				
Observaciones:	Se cumple requisitos de resistencia a compresión exigido.				
<p>Normas de Referencia:</p> <p>NCh - 170/2016 - Hormigón - Requisitos generales.</p> <p>NCh - 1017/2009 - Hormigón, confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y hendimiento</p> <p>NCh - 1171/1/2012 - Hormigón - Testigos de hormigón endurecido - Parte 1 - Extracción y ensayo</p> <p>NCh - 1171/2/2001 - Hormigón - Testigos de hormigón endurecido - Parte 2 - Evaluación de resistencia mecánica</p> <p>NCh - 1172/2010 - Hormigón - Refrentado de probetas</p> <p>NCh - 1037/2009 - Hormigón, ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas</p>					
<p>SOLERAS TESIS</p> <p>RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS 15 x 30 cm.</p>					
Muestra N°	Probeta N°	Fecha de fabricación	Fecha de ensayo	Edad de ensayo	Compresión individual (Mpa)
1	1	26-01-2023	02-02-2023	7	20,7
2	2	26-01-2023	09-02-2023	14	33,0
3	3	26-01-2023	23-02-2023	28	37,9
4	4	26-01-2023	23-02-2023	28	37,4
 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p style="margin: 0;">Ignacio Ismael Contreras Castro Encargado de calidad</p> </div>					