

*Artículo Científico***Hormigón reciclado: una alternativa tecnológica para la vivienda ecológica****Recycled concrete: a technological alternative for ecological housing**

César Rojas Montaña

Arquitecto, Magíster en Tecnología y Gerencia de la Construcción. Docente de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Privada del Valle
arqcrm@gmail.com

RESUMEN

Se estudió en el presente trabajo de investigación el comportamiento del hormigón reciclado al ser reemplazado con distintos porcentajes de árido grueso reciclado, proveniente de hormigones demolidos. Para esto, se confeccionaron mezclas denominadas hormigón de control (HC) y de prueba designadas como hormigón reciclado (HR), sustituyéndolas por distintas proporciones en porcentaje de peso. En cada muestra se estudió la trabajabilidad, densidad y resistencia del hormigón a la compresión. Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre todos los resultados obtenidos, aplicados a la construcción de una viga prototipo, que es sometida a una serie de controles de calidad y resistencia para demostrar que sí es posible su utilización como elemento estructural para la vivienda.

Por lo tanto, este artículo pretende resumir y valorar los resultados obtenidos para poder aplicarlos como una alternativa en la construcción de viviendas en la zona de Cercado de Cochabamba y así lograr avanzar hacia la vivienda ecológica "ideal". Este artículo se basa en la tesis de investigación de la Maestría en Tecnología y Gerencia de la Construcción, titulada "Utilización de árido reciclado en la elaboración de hormigón estructural para su uso en la construcción de

la vivienda en Cochabamba", realizada en la Universidad Mayor de San Simón en el año 2015.

Palabras clave: Hormigón reciclado. Alternativas de reconstrucción. Elementos constructivos. Reutilización. Áridos reciclados. Costos en la construcción.

ABSTRACT

The behavior of recycled concrete was studied in the present research work when it was replaced with different percentages of recycled coarse aggregate, coming from demolished concrete. For this, mixtures called control concrete (HC) and test were designated as recycled concrete (HR), replacing them by different proportions in percentage of weight. In each sample, the workability, density and resistance of concrete to compression were studied. Finally, a comparative analysis was made among all the results obtained, applied to the construction of a prototype beam, which is subjected to a series of quality and resistance controls, to demonstrate that it is possible to use it as a structural element for housing.

Therefore, this article aims to summarize and assess the results obtained to be able to apply them as an alternative in the construction of

houses in the area of Cercado de Cochabamba and thus achieve progress towards the "ideal" ecological housing. This article is based on the research thesis of the Master in Technology and Construction Management, entitled "Use of recycled aggregate in the production of structural concrete for use in the construction of housing in Cochabamba", carried out at the University Mayor of San Simón in 2015.

Keywords: Recycled concrete. Construction alternatives. Constructive elements. Reuse. Recycled Arid. Construction costs.

INTRODUCCIÓN

Se empieza identificando la problemática de la contaminación por residuos de construcción, donde se tienen tres variables que hacen al problema general, las cuales son explicadas a continuación.

Identificación de la problemática

Contaminación ambiental por RCDS = reutilización

En los últimos años, el concepto de sustentabilidad (referido a las 3Rs: reducir-reutilizar-reciclar) está adquiriendo mayor importancia en todo el mundo (Estrela, 2012), entendiéndolo como un proceso INTEGRAL donde un objeto se convierte en un nuevo producto para prevenir el desuso y desecho de estos materiales.

La industria de la construcción genera cada vez más grandes cantidades de desechos y residuos de construcción y demolición (RCD). En la actualidad, la disposición final de los RCD se realiza en forma indiscriminada en ríos, quebradas, lechos de río y suelos horadados en el sector de las ladrilleras de la ciudad de Cochabamba, dándose así una gran contaminación ambiental (Rodríguez, 2010).

El boom de la construcción en los últimos cinco años hace necesaria la utilización de cada vez más materiales de construcción, como son los agregados para el hormigón. Este recurso no renovable produce deterioros y daños al medio

ambiente al producirse la sobreexplotación no planificada y no controlada por los municipios y el gobierno.

Tecnología del hormigón reciclado= resistencia

En la necesidad de investigar y experimentar nuevos materiales, se da la posibilidad de reutilizar hormigones de escombros demolidos en la fabricación de hormigones reciclados. Si bien existen estudios sobre este tipo de materiales y sustituciones de los agregados gruesos, con resultados óptimos analizados en laboratorio (López, 2008), aún faltan más estudios en Bolivia y Cochabamba sobre el comportamiento mecánico del hormigón reciclado (HR) para la determinación de dosificaciones que garanticen la resistencia mínima requerida para el uso estructural y así poder tener datos científicos y concretos en nuestro medio.

Parámetros de costos= precios

Los costos de los insumos de la construcción (como agregados gruesos) van en constante ascenso, elevándose hasta duplicarse en los últimos 2 años (LosTiempos, 2011); esto debido a las distancias y escase de este material en época de lluvia y riadas, principalmente.

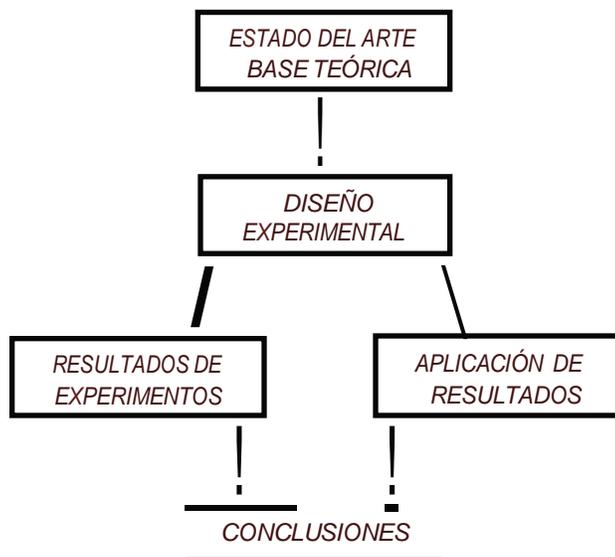
No existen análisis de costo detallados, claros y concretos respecto a la utilización del HR, por lo que se hace necesario un análisis comparativo de valoración de costos de cada uno de los componentes.

Metodología:

Está estructurada en cuatro etapas:

- 1° Etapa: Estado del arte y base teórica.
- 2° Etapa: Caracterización de los materiales, para el hormigón de control y el reciclado.
- 3° Etapa: Desarrollo experimental y fabricación del prototipo de hormigón reciclado mejorado.
- 4° Etapa: Propuesta de HR aplicada a la vivienda, para su valoración tecnológica y ecológica.

Diagrama N°. Esquema metodología de trabajo



Fuente: Elaboración propia, 2015

Estado del arte y base teórica
Investigación documentada

Se procedió al trabajo de investigación documentada con los siguientes resultados:

El crecimiento poblacional y el déficit habitacional

En el departamento de Cochabamba se tiene que el crecimiento anual es de 1,68% con una población total de 1758143 habitantes, correspondiendo a Cercado 630 587 habitantes, de los cuales el 53,73 % cuenta con vivienda propia, el 25,47 % es alquilada y el 21,92 % con otra modalidad de acceso a la vivienda (INE, 2013); teniéndose un total del 46,27 % que no cuenta con vivienda.

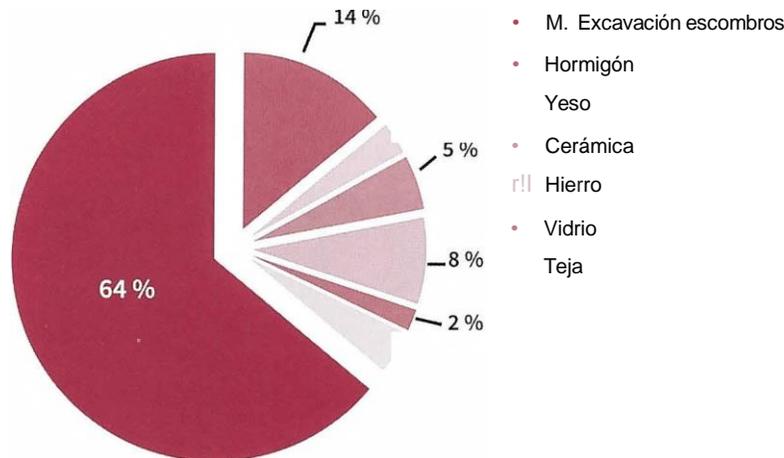
Realizando el cálculo del déficit habitacional, se puede manifestar que un total de 291 772 personas no cuentan con vivienda propia; si se calcula que una familia tiene un promedio de 4 a 6 personas, faltarían 48 628 viviendas en la provincia de Cercado.

Al tratar de satisfacer esta y otras demandas, la industria de la construcción genera una gran cantidad de desechos, ya sea por el mismo proceso de construcción o por las demoliciones, siendo la principal fuente de residuos de construcción y demolición (RCD).

La contaminación ambiental por RCD, en el Cercado de Cochabamba

De acuerdo con el estudio realizado por ciudades focales y la Sociedad de Gestión Ambiental Boliviana (SGAB), se detectaron grupos generadores de residuos (especialmente de orden civil), de los cuales se tiene:

Gráfico N°. Composición de los RCDs de hormigón



Fuente: Elaboración propia con base a SGAB, 2011-2012

Es decir, que del total de RCDs se tiene 36 % de escombros en general y de este porcentaje sólo figura el 64 % de escombros específicos de hormigón, lo que significa que del 100 % se cuenta con el 23,04 % ($36 \times 64 \% = 23,04\%$) de escombros específicos de hormigón.

Es generada mensualmente en la ciudad de Cochabamba una gran cantidad de escombros de hormigón (hasta 9 933 m³/mes) y en un periodo anual este monto se eleva hasta 119 198 m³/año, de los cuales el 23,04 % (es decir 27 463,21 m³) son escombros específicos de hormigón.

A partir de estos datos que se logra obtener la Producción Per Cápita (PPC) que -comparada con datos de países de Sudamérica- en Cochabamba es mucho más elevada, siendo que en otros lugares se logra generar menor cantidad de residuos por sus tecnologías, gestión, normativas y controles.

Tabla N°. Comparación de la PPC de escombros con las de otras ciudades del mundo

Tipo de residuo	PPC [Kg/habitante]				
	Cochabamba	Colombia	USA	China	España
Escombros	1,510	1,33	1,27	4,93	3,02
Material de excavaciones	1,702				
Restos de agregados	0,198				
Restos de madera	0,143				
Restos de material de construcción	0,034				
Total PPC	3,590	1,33	1,27	4,93	3,02

Fuente: SGAB - Ciudades Focales, 2010

La sobreexplotación de áridos naturales en Cochabamba

La explotación de piedra, ripio y arena para la construcción en los ríos del Valle Alto está fuera de control, con efectos ambientales severos: tala de árboles nativos, desmonte de ríos, inutilización de suelos productivos, desaparición de flora, microflora y fauna silvestre y también riesgo de inundaciones.

Tabla N°2. Resumen de estudios a nivel nacional

Estudio	Objetivo	Resultados
<p>Reinserción de escombros de demolición como agregado grueso reciclado en mezclas de hormigón. Ponencia Universidad Técnica de Oruro (2007) Autor: Edson Freddy Carrasco Blanco</p>	<p>Demostrar los escombros del Proyecto de renovación de aceras del centro de la ciudad de Oruro, transformados en agregado grueso reciclado y sustituidos en una parte del agregado grueso natural para la fabricación de hormigones.</p>	<p>La resistencia a la compresión, con sustitución del 20 %, se tiene resistencias mayores la hormigón de control de hasta 5,6 - 14,51%</p>
<p>Comportamiento físico mecánico del hormigón reciclado a la compresión con materiales seleccionados de hormigones demolidos. Tesis Universidad Mayor de San Simón (2013)</p>	<p>Evaluar el hormigón reciclado, que puede ser reutilizado en la construcción de elementos de hormigón de media y baja resistencia, a partir de la comparación de los resultados de estudio físico mecánicos de un hormigón reciclado y un hormigón de control.</p>	<p>Las resistencias del hormigón reciclado promedio es de 190 kg/cm², con datos menor de 168 y mayor de 205kg/cm² a los 28 días. Finalmente, concluye que la propuesta planteada es de fácil aplicación en obras de condiciones normales, para ser utilizados en obra</p>

Fuente: Elaboración propia, 2015

El análisis de la tabla N°2 permite concluir que de acuerdo a los resultados obtenidos se recomienda la sustitución de hasta el 20 % de AGR, con lo que se logra una resistencia a la compresión de 190-205 kg/cm².

Tabla N°3. Resumen de estudios a nivel internacional

Estudio	Objetivo	Resultados
<p>Empleo del árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural Tesis de Maestría Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana (2012) Autor: Elier Pavón de la Fe</p>	<p>Estudiar la variación de las propiedades físicas y mecánicas de los áridos reciclados gruesos. Se analizó la influencia de la calidad y cantidad de los porcentajes de sustitución de 25-50-100 %.</p>	<p>Del 25 % no afecta la resistencia a la compresión. La resistencia es de 25-30MPa a los 28 días. Las sustituciones del 50-100 % disminuyen la resistencia en 15-30 %. Finalmente la sustitución de AR del 25 %, no afecta la resistencia a la compresión. La resistencia es de 25-30MPa a los 28 días. Las sustituciones del 50-100 % disminuyen la resistencia en 15-30 %.</p>
<p>Concreto reciclado. Tesis licenciatura Ingeniería Civil. Instituto politécnico nacional México (2004) Autor: Jorge Arturo Cruz García y Ramón Velázquez Yañez</p>	<p>Realizar un estudio del comportamiento de los residuos de construcción y demolición, especialmente del escombro para que se pueda utilizar como agregado en el concreto. Así como determinar el empleo de este en el área de la construcción, dependiendo de su resistencia específica a los 28 días (que se alcanza a la edad de 28 días).</p>	<p>El escombro de concreto libre de contaminantes es un sustituto satisfactorio como agregado grueso en la elaboración de nuevos hormigones. Las propiedades de rigidez, durabilidad y trabajabilidad son aceptables. Inicialmente indica que el reciclaje de concretos demolidos soluciona problemas de contaminación, tanto en la extracción de agregados naturales como en la disposición de los RCD.</p>

<p>Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.</p> <p>Tesis de Maestría Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos (2004) Autor: María Sánchez de Juan</p>	<p>Limitar el contenido de árido reciclado en el hormigón, de acuerdo a la influencia de distintos porcentajes de árido reciclado en su calidad.</p> <p>Aplicaciones en los que pueden ser utilizados y recomendaciones sobre la fabricación del hormigón reciclado.</p>	<p>El contenido de agua se incrementa en 5-12 %, de acuerdo al porcentaje de sustitución.</p> <p>La resistencia con AR al 100 % baja al 13-24 %, con AR de 20-50 % de - 5+6 % - 31+20 %</p>
--	--	---

Fuente: Elaboración propia, 2015

De igual manera, el análisis de los resultados de la tabla N°3 permite establecer que se tiene una resistencia a la compresión de 25-30 Mpa con la sustitución de hasta el 20 % de AGR y su disminución con sustituciones del 30-50 % son de 1,55-4,31 %. Se obtuvieron características diferentes: mayor absorción y menor peso específico, así como la cantidad de finos producidos del 5-10 %.

Producción de los agregados reciclados de los residuos de hormigones

Previo a este proceso, se tiene la demolición en obra, la preselección y la selección por tipos de materiales. Dentro los tipos de producción se tienen dos, la producción mecánica y la artesanal, que son explicados a continuación:

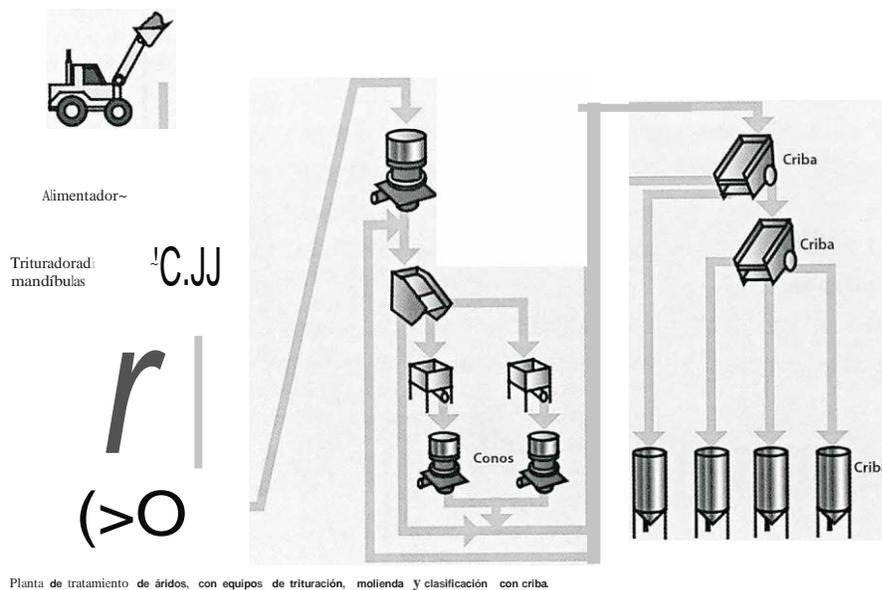
a) Proceso de producción mecánica

El proceso de producción (Guijarro, 2008) varía de acuerdo con las plantas industriales dedicadas a este trabajo, pero básicamente se pueden considerar las siguientes etapas: trituración primaria y secundaria, remoción, selección y separado de otros objetos, gradado y lavado, acopio de agregados fino y grueso.

Para nuestro estudio sólo se utilizará el agregado reciclado grueso.

Diagrama N°2. Procesos de producción de RCDs

ESQUEMA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE ÁRIDOS



Planta de tratamiento de áridos, con equipos de trituración, molienda y clasificación con criba.

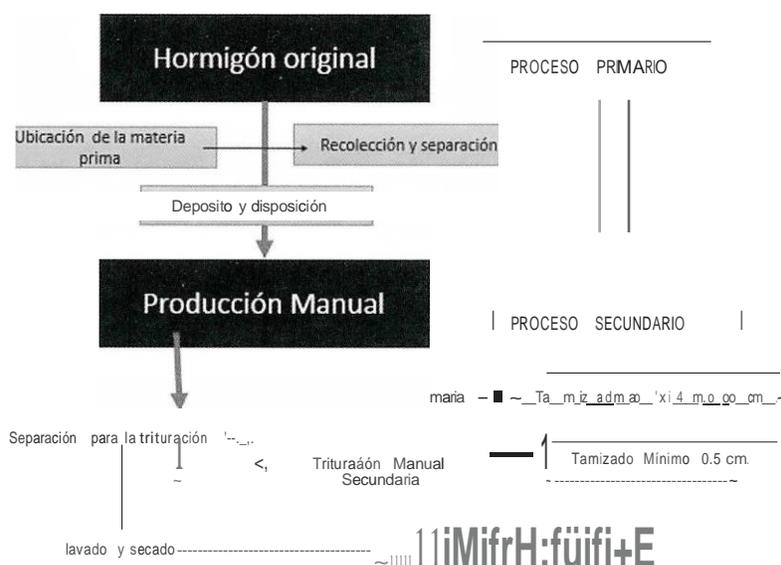
Fuente: Elaboración propia, 2015

Las plantas de producción de áridos reciclados pueden clasificarse en función a su movilidad en fijas, semifijas y móviles y de acuerdo con los procesos de producción y su tecnología en plantas de 1°, 2° y 3° generación.

b) Proceso de producción manual o artesanal

Se proveyó para este estudio la implementación de un sistema de trituración manual o artesanal, para lo cual de acuerdo con la bibliografía se utilizará el mismo procedimiento que una planta móvil de producción de árido reciclado bajo el siguiente esquema base:

Diagrama N°3. Proceso de producción Manual



Fuente: Elaboración propia, 2014

Sin embargo, debemos aclarar que -en este caso- el proceso primario consiste en la recolección de la materia prima y el proceso secundario está en la producción manual, propiamente dicha. Todo este trabajo se realizó en un laboratorio propio adecuado para esta tesis de investigación, el cual es detallado a continuación:

Fotografías N°1, 2, 3 y 4. Proceso de producción manual

Trituración primaria y secundaria

Acopio agregado grueso



Fuente: Elaboración Propia, 2015

Para el trabajo de investigación se obtuvo tanto el agregado reciclado grueso como el fino, pero sólo se utilizará el primero.

Normativas para la utilización de áridos reciclados

La normativa nacional no contempla parámetros de utilización de los áridos reciclados para la elaboración de hormigones; mientras que -en el ámbito internacional- varios países cuentan con normas específicas.

Las normativas de España y Japón nos muestran parámetros muy específicos respecto a la calidad y características máximas y mínimas requeridas para certificación de los áridos reciclados que se utilizaran en la elaboración de hormigones de tipo estructural (como ser densidad, absorción, contenido de finos, impurezas y pérdida de material por lavado). Cumpliendo estas especificaciones, los áridos reciclados pueden ser certificados para ser utilizados en hormigones.

La normativa de EE. UU. y Brasil muestran parámetros mucho más generales (como requisitos de granulometría y dureza), clasificando los tipos de agregados para hormigones estructurales y otros tipos de usos. Cumpliendo estos parámetros, estos áridos reciclados pueden ser utilizados en edificaciones.

Absorción máxima	3-20 %
Máximo contenido de finos	2-3 %
Densidad seca	2400-1500 kg/m ³
Contenido de material extraño	1-5 %
Sustitución AGR	10-20%

Residuos limpios max. 5% otros mat.
 Granulometría dentro parámetros
 Residuos de construcción tipo B aptos para su utilización

Caracterización de los materiales

Agregado fino natural

La arena es un conjunto de partículas de rocas disgregadas, denominado en geología como el material compuesto de partículas, cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros (mm).

Tabla N°4. Requisitos de gradación para agregados finos

Tamiz	Porcentaje que pasa
3/8"	100
N°4	95-100
N°8	80-100
N016	50-85
N° 30	25-60
N° 50	10-30
N° 100	2-10

Fuente: Elaboración propia con base a Moran-Jimenez Montoya, 2011

Agregado grueso natural

La grava es el conjunto de fragmentos gruesos procedente de la meteorización de la roca que han sido arrastrados por el viento o por las corrientes de agua, donde cada fragmento ha perdido sus aristas vivas y se presenta en formas más o menos redondeadas.

Tabla N°S. Requisitos de gradación para los agregados gruesos

Tamaño nominal	Cantidades más finas que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), % en peso												
	4" 100 mm	3/4" 90 mm	3" 75 mm	2 1/2" 63 mm	2" 50 mm	1 1/2" 37.5 mm	1" 25.0 mm	3/4" 19.0 mm	1/2" 12.5 mm	3/8" 9.5 mm	N°4 4.75 mm	N°8 2.36 mm	N°16 1.18 mm
3/2" a 1 1/2"	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5					
2 1/2" a 1 1/2"	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5					
2" a N°4	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0-5		
1 1/2" a N°4	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5		
1 a 3/8"	-	-	-	-	-	100	95-100	40-85	10-40	0-15	0-5		
1" a N°4	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	
3/4" a N°4	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	
2" a 1"	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5				
1 1/2" a 1"	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5			
1" a 1/2"	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5			
3/4" a 3/8"	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5		
1/2" a N°4	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	
3/8" a N°8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5

Fuente: Elaboración propia con base a Moran-Jimenez Montoya, 2011

Agregado grueso de hormigón reciclado

Para brindar una explicación completa, se plantearán dos preguntas:

- a) ¿Qué son los áridos reciclados procedentes de RCDs?

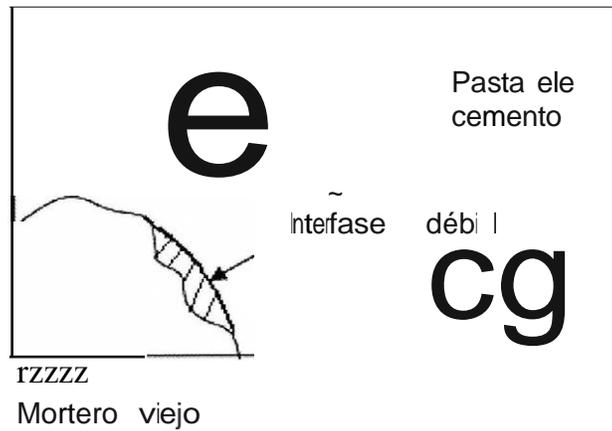
Son aquellos materiales resultantes del tratamiento de material inorgánico previo a la demolición en la construcción. Es el principal producto de valorización de los RCD obtenido a partir de la parte pétreo gruesa de estos residuos.

Para este estudio se utilizará el árido grueso reciclado (AGR), cuya obtención y procedencia será explicada más adelante.

- b) ¿Qué son los hormigones reciclados?

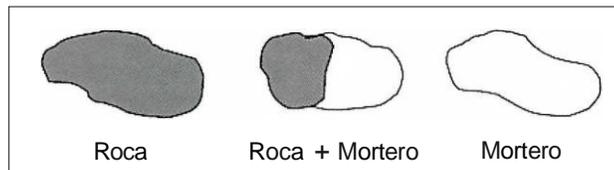
Son hormigones fabricados con áridos en su fracción gruesa, reciclados procedentes de residuos de hormigón, en una mezcla de árido grueso reciclado y árido fino natural, mezclados con cemento y agua como aglutinantes formando una pasta homogénea.

Figura N°2. Composición del hormigón reciclado



Fuente: Vázquez y Barra, 2002

Figura N°3. Características de los agregados gruesos reciclados

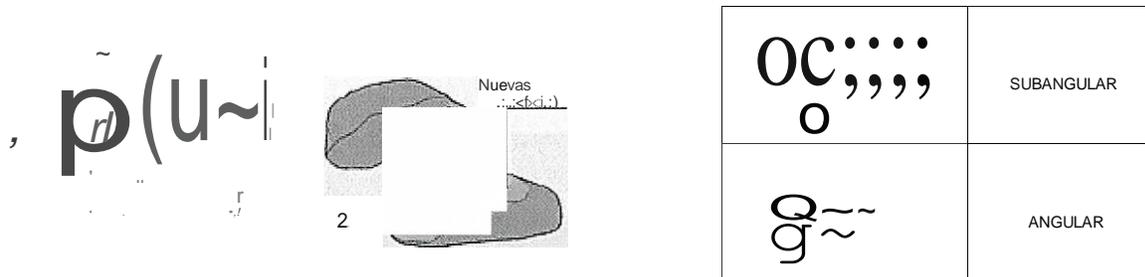


Fuente: Vázquez y Barra, 2002

Características básicas

Por el tipo de producción de los AGR, estos son partidos en piezas de menor tamaño, lo que da lugar a nuevas superficies que tienen formas subanguladas y anguladas (es decir, con terminaciones en vértice y puntas).

Figura N°4. Forma y textura



Fuente: Vázquez y Barra, 2002

Obtención y procedencia del AGR procedente de la demolición de hormigones

Para este trabajo se selecciona -además de realizar pruebas de esclerometría- a las piezas extraídas para tener datos de resistencia antes de su utilización.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla N°6. Tabla de resultados

Ensayo	Elemento ensayado	Resistencia	Unidad
1	Pieza mayor 60X80 cm	198	kg/cm ²
2	Pieza intermedia 40X50 cm	211	kg/cm ²
3	Pieza intermedia 35X40 cm	220	kg/cm ²
4	Pieza menor 20X20 cm	195	kg/cm ²

Fuente: Elaboración propia, 2016

Fotografía N°5. Cargado de materia



Fuente: Elaboración propia, 2016

Fotografía N°6. Acopio de material



Fuente: Elaboración propia, 2016

Cemento Portland IP30

Es un cemento hidráulico producido por la pulverización del clinker Pórtland, usualmente en combinación con sulfato de calcio. Para este estudio se utilizó el Cemento Coboce IP30

Fotografía N°7. Bolsa de Cemento COBOCE

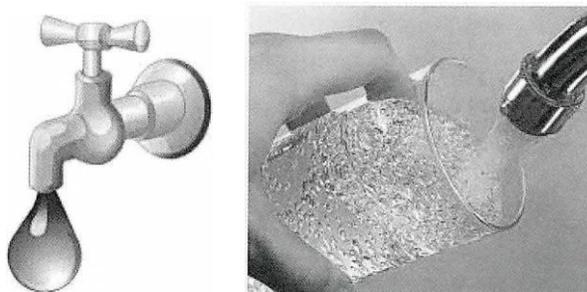


Fuente: Elaboración propia, 2014

Agua

El agua para amasar y curar el hormigón será satisfactoria si es potable (adecuada para el consumo humano). Esta debe estar razonablemente limpia y sin cantidades dañinas de materia orgánica, fango y sales

Fotografía N°8. Agua potable



Fuente: Elaboración Propia, 2015

Aditivos

Para este estudio se utiliza el impermeabilizante -SIKA I. Este aditivo pueden reducir los espacios entre los poros visibles y retardar la penetración de la lluvia en el hormigón o bloques porosos mediante un aumento de compacidad de los hormigones.

Fotografía N°9. Bolsa de impermeabilizante SIKA



Fuente: Elaboración propia, 2014

Pruebas de laboratorio

Normativas para el desarrollo y trabajos de laboratorio

La American Society for Testing and Materials (ASTM) es una organización con bases muy amplias formada por productores, consumidores y grupos de interés general. Sus estándares son muy utilizados en nuestro medio, ya que están más actualizados y aportan una mayor cobertura que las normas bolivianas.

Para la estandarización de los procesos en la fabricación de hormigones -y que estos puedan tener la calidad y garantías adecuadas- se confeccionan los hormigones bajo normas ASTM (el cual es un organismo de normalización de los EE. UU.), donde tenemos los siguientes resultados:

- a) Para los agregados
 - Muestreo de agregado grueso y fino (ASTM C75)
 - Análisis de granulometría (ASTM C 136)
 - Absorción (ASTM C 127)
 - Peso específico/densidad relativa (ASTM C 127)
 - Contenido de humedad (ASTM D 2216)
 - Peso volumétrico suelto y compacto (ASTM C 29)
 - Prueba de resistencia y abrasión, Los Ángeles (ASTM C131)
- b) Para el preparado del hormigón
 - Vaciado de las muestras de concreto (ASTM C 175)
 - Prueba de trabajabilidad de la mezcla (ASTM C 143)
- c) Para su resistencia
 - Curado de cilindros (ASTM C31)
 - Resistencia a la compresión (ASTM - C39M)

Todos estos procedimientos fueron detallados y trabajados en el laboratorio de tipo particular y otros ensayos se realizaron en el laboratorio propio preparado para esta investigación.

a) Batería de pruebas N°1

Para el HC se realizó la caracterización del agregado fino natural y el agregado grueso natural.

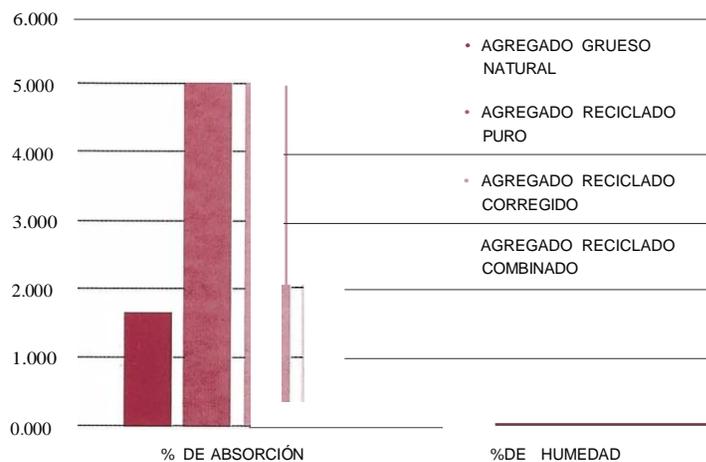
b) Batería de pruebas N°2

Para el HR se realizó la caracterización del agregado grueso reciclado PURO, agregado grueso reciclado corrección, granulométrica y agregado grueso reciclado combinado (natural y reciclado).

Síntesis comparativa de resultados

Los resultados de laboratorio, de las baterías de pruebas N°1 y N°2, son los siguientes:

Gráfico N°2. Comparación de resultados, pruebas de absorción y humedad

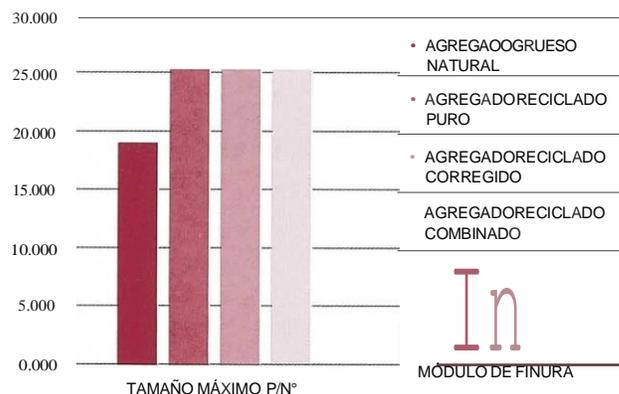


Fuente: Elaboración propia, 2015

Además de estos datos, debe mencionarse que -en el caso del árido reciclado dentro el proceso de laboratorio (manipulación, cernido y otros)- se produjeron materiales finos en una proporción del 10 %, del peso total.

Se puede ver que el porcentaje de humedad del árido reciclado puro incrementa {66 %} y cuando se combina con agregado natural, el porcentaje va disminuyendo en relación proporcional al porcentaje de sustitución.

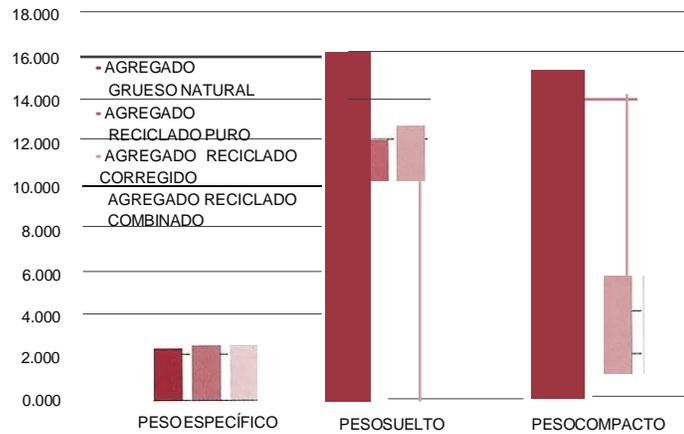
Gráfico N°3. Comparación de resultados, pruebas de granulometría



Fuente: Elaboración propia, 2015

En el caso del módulo de fineza, este varía para el caso del agregado reciclado puro sin corrección y el caso del combinado con árido natural.

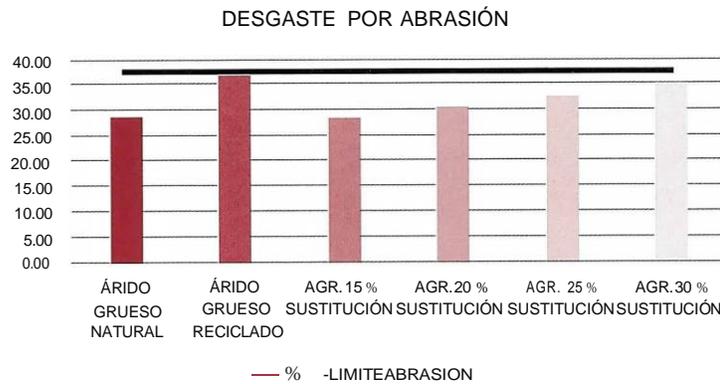
Gráfico N°4. Comparación de resultados, pesos



Fuente: Elaboración propia, 2015

En lo que respecta a los pesos, el agregado reciclado es más liviano (5-25 %) que el árido natural, pero esto se incrementa al realizar la combinación con el agregado natural y los porcentajes de sustitución.

Gráfico N°5. Comparación de resultados, prueba de Los Ángeles



Fuente: Elaboración propia, 2015

La resistencia por abrasión muestra que el árido natural tiene 28,8 %, el reciclado puro 36,8 % y el de combinación 30,65 %.

La dureza del AGR es de un -37,3 % menor que el AGN. En el caso del AGR combinado es mucho menor en -14,36 %.

Desarrollo experimental

Vaciado del hormigón de control (HC)

Para lograr el vaciado del HC y obtener la resistencia mínima de H21 (210 kg/cm²) fue necesario realizar varios ensayos modificando las dosificaciones (las cuales se realizaron en cinco grupos). Se vaciaron

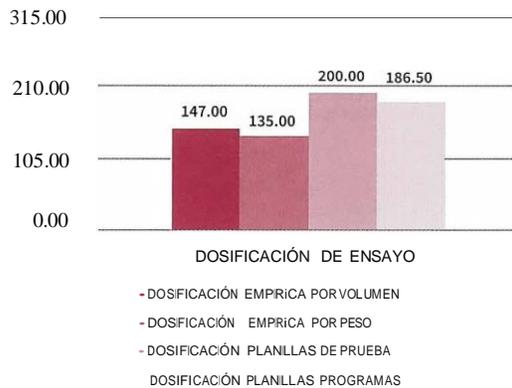
cilindros y sometieron a rotura, escogiéndose aquellos que obtuvieron los datos más elevados (para finalmente confirmar la resistencia), repitiendo la dosificación escogida y la rotura de cilindros con los siguientes resultados:

- TO-T06- Dosificación de ensayo/ Total de cilindros: 27
- TI-TIO - Dosificación de prueba/ Total de cilindros: 54
- TII-T20 - Dosificación para resistencia/ Total de cilindros: 36
- T21-T28 - Dosificación H21 / Total de cilindros: 32
- T29-T37 - Dosificación confirmada para H21 / Total de cilindros: 36
- Total de cilindros vaciados para el hormigón de control HC: 185 piezas

Síntesis comparativa de resultados

Unidades de presión:
210 kg/cm²= 20.59 MPa.
210 kg/cm²= 2.059 kn/cm²

Gráfico N°6. Resultados de resistencia de la dosificación de ensayos



TO-T06: dosificación de ensayo
En la primera etapa de ensayos se percibe que la mejor dosificación es la planilla (Excelr propio) que cual llega a 200 kg/cm². Se tiene 19.60 Mpa

Fuente: Elaboración Propia, 2015

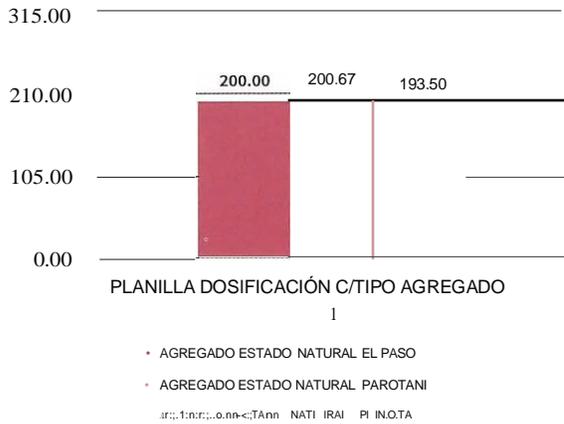
Gráfico N°7. Resultados de resistencia de la dosificación de prueba



TI-TIO: dosificación de prueba
Se prueban dos tipos de dosificaciones, donde la de mayor resistencia es la de tipo 1 (con su repetición para conformación), a partir de la cual se le aplicaron aditivos, logrando un incremento de 25 % en su resistencia promedio.

Fuente: Elaboración Propia, 2015

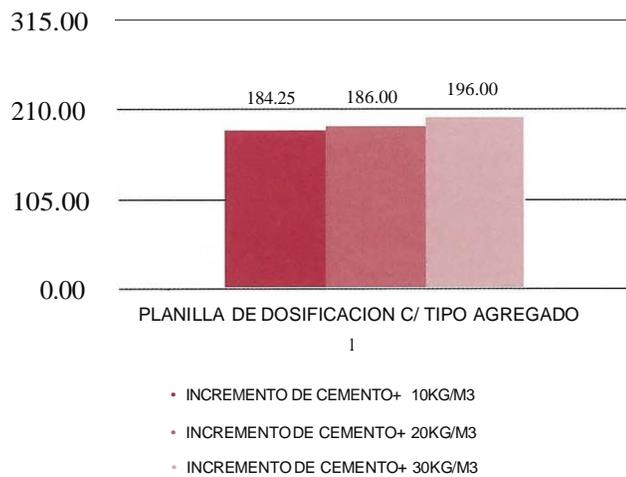
Gráfico N°8. Resultados de resistencia de la dosificación de resistencia ideal



TII-T20: dosificación de resistencia
De los diferentes agregados, el de Parotani es el de mayor resistencia, llegando a 200,67 kg/cm², siendo el seleccionado.
Del incremento de cemento, se ve que por cada 10 kg se aumenta la resistencia en un 3,5%.
Con agregado lavado 4 veces se incrementa al 15 %.

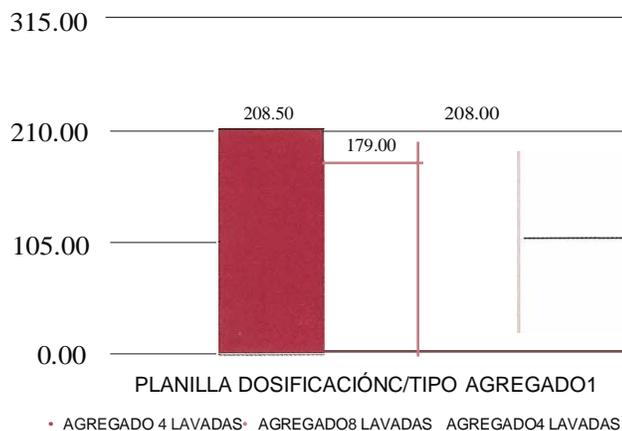
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Gráfico N°9. Resultados de resistencia de la dosificación con incremento de cemento



Fuente: Elaboración Propia, 2015

Gráfico N°10. Resultados de resistencia de la dosificación con agregados más lavados



Fuente: Elaboración Propia, 2015

Gráfico N°II. Resultados de resistencia de la dosificación con aditivos



Dosificación con aditivos

Se puede ver que, al utilizar aditivos, el incremento de la resistencia llega a 2 % con SIKA, 30 % con plastificante y 10 % con superplastificante, pero va en decremento al utilizar superplastificante.

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Vaciado del Hormigón de Reciclado (HR)

Para lograr el vaciado del Hormigón de Control (HR) y obtener la resistencia mínima de H21 (210 kg/cm²), se siguió el mismo procedimiento anterior, con los siguientes resultados:

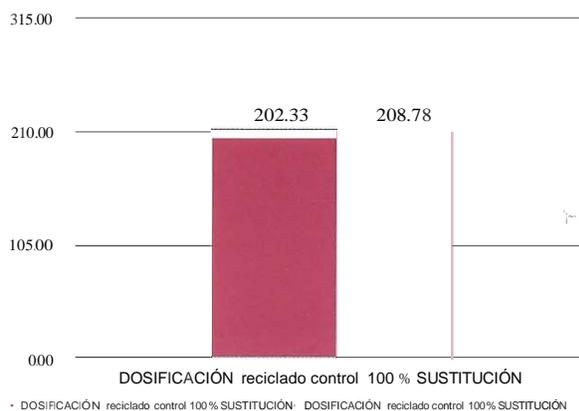
RI-R9 - Dosificación hormigón reciclado de control con 100 % de sustitución/Total de cilindros: 36

RI0-R21 - Dosificación hormigón reciclado de 15-20-25-30 % de sustitución con incremento de cemento/Total de cilindros: 36

R22-R33 - Dosificación hormigón reciclado de 15-20-25-30 % de sustitución con incremento de aditivos/Total de cilindros: 36

Total de cilindros vaciados para el hormigón reciclado H.R.: 108 piezas

Gráfico N°12. Resistencia con 100% de árido reciclado



RI-R9: dosificación 100 % sustitución reciclado y aditivos

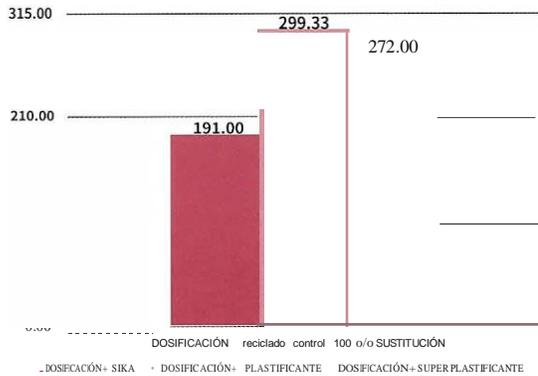
Se realizaron dos pruebas para confirmar la dosificación de control con 100 % de sustitución de árido reciclado, con una variación del 3,5 % entre pruebas de 202,33 y 208,78 kg/cm².

Se tiene 20,47 Mpa.

Se agregaron aditivos, donde el de mayor incremento de resistencia es el plastificante con 56 % de incremento y superplastificante con -10 %.

Fuente: Elaboración Propia, 2015

Gráfico N°13. Resistencia con 15-20-25-30% de sustitución de árido reciclado

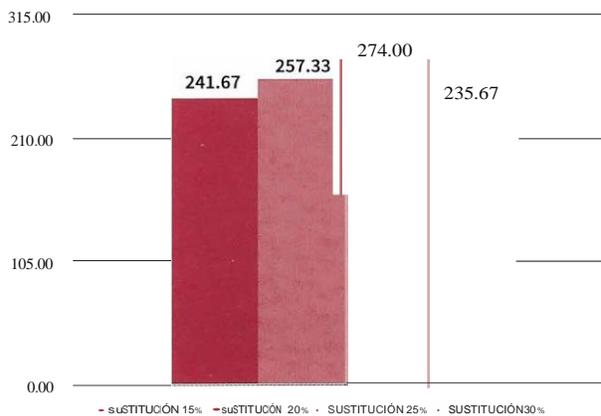


R10-R21: dosificación (h) 15-20-25-30 % sustitución reciclado e incremento de cemento

Con la dosificación escogida, se realiza la sustitución del 15-20-25-30 % en cada grupo, se incrementa 50kg/m3 de cálculo, lo que da resultados mayores a 21, pero se tiene que el incremento de resistencia llega hasta el 20-25 %, al 30 % disminuye.

Fuente: Elaboración propia, 2015

Gráfico N°14. Resistencia con 15-20-25-30 % de sustitución de árido reciclado, con aditivos



R22-R33: dosificación (h) 15-20-25-30 % sustitución reciclado e incremento de aditivos

Al aplicar los aditivos, el incremento de la resistencia se da entre 20-25 %, decayendo nuevamente en el 30%.

Los incrementos mayores se dan con el plastificante de hasta, el 40 % de su resistencia, teniendo 267 kg/cm2 y 212 kg/cm2 como máximo y mínimo (plastificante).

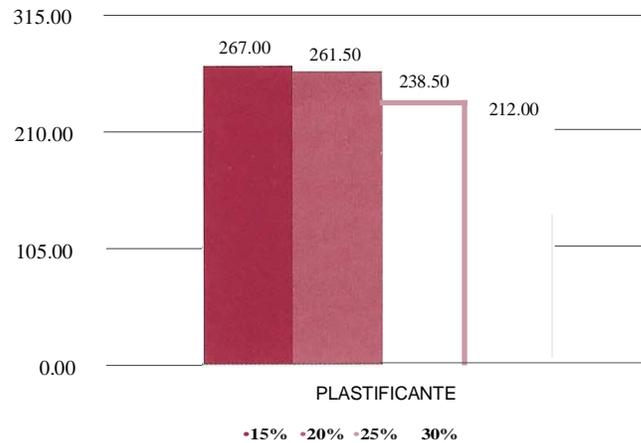
Fuente: Elaboración propia, 2015

Gráfico N°15. Resistencia con 15-20-25-30 % de sustitución de árido reciclado, con aditivos



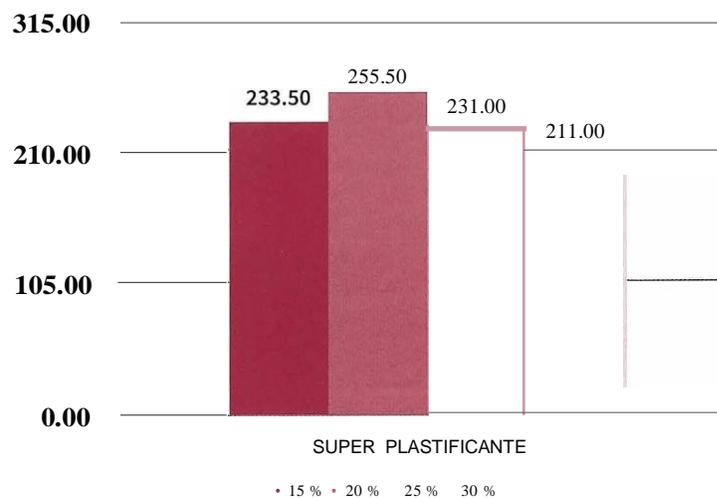
Fuente: Elaboración Propia, 2015

Gráfico N°16. Resistencia con 15-20-25-30 % de sustitución de árido reciclado, con plastificantes



Fuente: Elaboración Propia, 2015

Gráfico N°1 7. Resistencia con 15-20-25-30 % de sustitución de árido reciclado, con super plastificante



Fuente: Elaboración Propia, 2015

Se tiene confirmada cada una de las dosificaciones, alcanzando la resistencia por encima de 210 kg/cm²; esto da la condición y el requisito tecnológico para cumplir como hormigón de uso estructural.

Resultados

Fabricación de la viga prototipo (HR mejorado)

Se realizaron pruebas de cilindros y roturas para las dosificaciones de cada una de las vigas antes de ser vaciadas; posteriormente, se diseña cada una de ellas bajo la siguiente tipología:

- V1:** viga hormigón control {HCS} sin armadura 20x40x2,5
- V2:** viga hormigón control {HCA} con armadura 20x40x2,5
- V3:** viga hormigón reciclado {HR20} sin armadura con 20 % de sustitución 20x40x2,5
- V4:** viga hormigón reciclado {HR25} con armadura con 25 % de sustitución 20x40x2,5
- VS:** viga hormigón reciclado {HRA20} sin armadura con 20 % de sustitución+ aditivo Sika 20x40x2,5



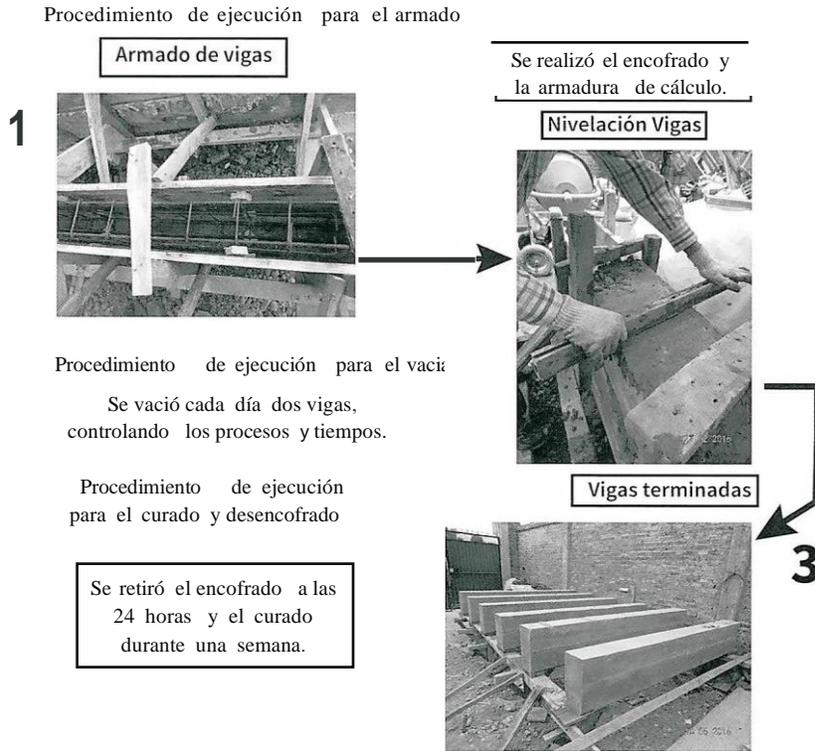
V6: viga hormigón reciclado (HRA25) con armadura con 25 % de sustitución+ aditivo plastificante 20x40x2,5

V7: viga hormigón reciclado (HR20) sin armadura con 20% de sustitución 20x20x2,5

V8: viga hormigón reciclado (HR20) sin armadura con 20% de sustitución 20x20x2.5

Armado y vaciado de la viga prototipo de HR (escala real)

Figura N°5. Esquemasíntesis

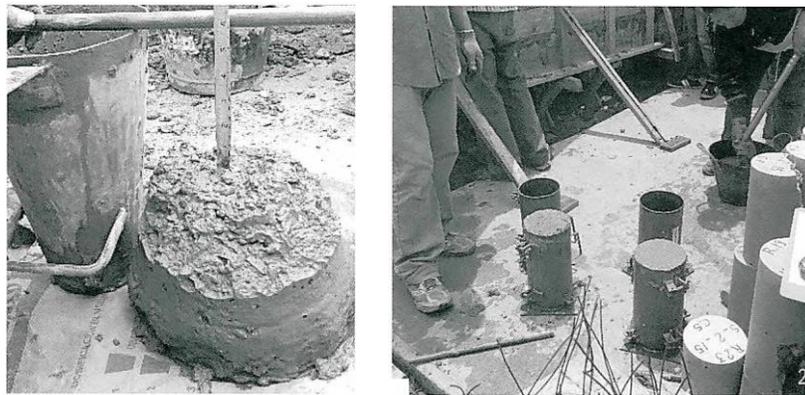


Fuente: Elaboración Propia, 2015

Ensayos de control y pruebas de calidad

a) Ensayos de laboratorio (toma de cilindros)

Fotografía N°ü. Cilindros testigos

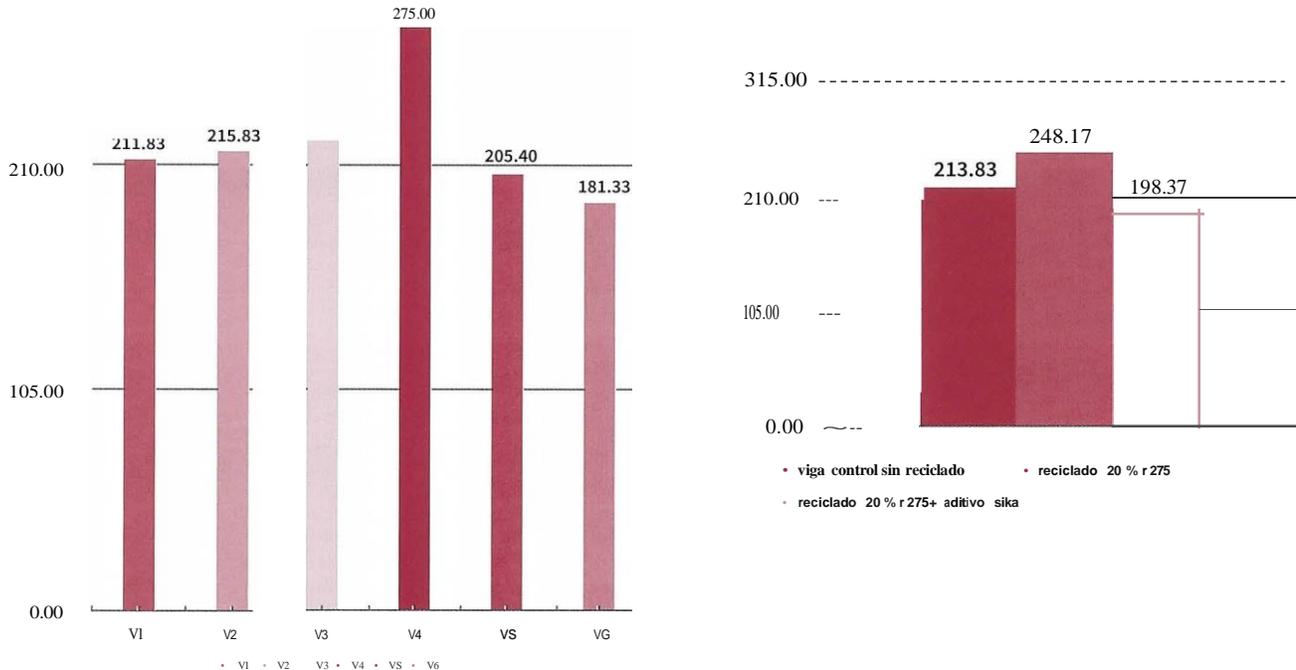


Fuente: Elaboración propia, 2015

Se realizaron 2 conos por cada viga, en total 12 conos. Se extrajeron 3 cilindros por cada viga, en total 18 cilindros.

b) Resultado estado endurecido y pruebas de resistencia alcanzada

Gráfico N°18 y 19. Resultados resistencia



Fuente: Elaboración propia, 2015

Resistencia promedio característica:
 La viga con la dosificación de hormigón de control se ratifica con 213,83 kg/cm² de resistencia.
 La viga con sustitución del 20 % de árido reciclado llega a 248,17 kg/cm², también ratificado.
 Finalmente, se detectó una disminución de la resistencia de 198,37 kg/cm² en la dosificación con aditivo, esto debido a la elevada absorción del árido grueso reciclado.

Aplicación del hormigón reciclado en la vivienda

Propuestas de aplicación del hormigón reciclado en la vivienda

Características de la vivienda Tipo Social

Se obtuvieron datos completos de costos (desde el proyecto), pasando por la aprobación, cómputos y presupuestos de toda la obra, finalizando con los análisis de incidencia por etapas y costos por etapas y metro cuadrado construido de UFVs {460000 x 2,07= Bs.-952 200, con un interés del 5,5%}.

Figura N°6. Vivienda construida y financiada por el Banco Unión, ubicada en el distrito 8 de la zona sud el año 2011



Fuente: Elaboración propia, 2015

Síntesis de resultados vivienda

Metros cuadrados construidos: 127,32

Cantidad de pisos: 2

M3 de hormigón total requerido: 6,71 (H. columna y viga)

M3 de arido reciclado grueso requerido: 0,987

Incidencia total del costo del HA en la obra general: 6,67 %

Incidencia total del costo del HA en la obra gruesa: 13,41 %

Incidencia total del costo del HA reciclado 20 % en PU: 0,92 %

Incidencia total del costo del HA reciclado 25 % en PU: 2,67 %

Porcentaje total de hormigón (volumen) en la obra general: 100,0 %

Porcentaje total árido reciclado (volumen) en la obra general: 14,70 %

Total costo incrementado con Hormigón reciclado (col-Vig): 0,88 %

Relación H. reciclado - Contenido de árido reciclado utilizado m³/m³: I=0,147

Relación M2 Viv. Const. - m³ de hormigón reciclado vaciado m²/m³: I=0,077

Relación M2 Viv. Const. - m³ de Árido reciclado suelto m²/m³: I=0,0081

Discusión

La valoración del árido reciclado para la elaboración del hormigón reciclado, en su aplicación a la vivienda, presenta los siguientes resultados:

- a) Evaluación ambiental y ecológica: cantidad de material de áridos reciclados aplicados a las construcciones aprobadas por la H.A.M. Cercado

Tabla N°7. Aplicación del% 20 Sustitución AGR

Datos	Cantidades	Utilización	Porcentaje
Viviendas aprobadas	529706,44 m ²	En elementos de hormigón	50%
Hormigón necesario V-C	40544,32 m ³	En vigas y columnas	100%
Árido reciclado p/utilizar	4273,14 m ³	Sólo agregado grueso reciclado	14,5%
Total de escombros generados/año	120268,80 m ³	Disminución de parte del RCDS de hormigón	3,55%
Total escombros general/año	522000,00 m ³	Disminución del Total de los RCD	0,82%

Fuente: Elaboración propia, 2015

Si utilizáramos el árido reciclado para la elaboración de hormigón reciclado estructural en vigas y columnas en las construcciones aprobadas en el Cercado, del total de RCD generados anualmente (de los cuales 40 544,32 m³ son escombros de hormigón), podremos reducir la contaminación general de residuos en un 0,82 % y del total de escombros específicos de hormigón en un 3,55 %.

b) Cantidad de material de áridos reciclados aplicados al déficit habitacional en Cercado

Tabla N°8. Aplicación del% 20 Sustitución AGR

Datos	Cantidades	Utilización	Porcentaje
Déficit habitacional anual	14 768,00 ud.	En elementos de hormigón	30,36 %
Déficit habitacional acumulado	48 628,00 ud.	En vigas y columnas	100%
Árido reciclado p/utilizar	9 836,84 m ³	Sólo agregado grueso reciclado	
Total de escombros generados/año	120 268,80 m ³	Disminución de parte del RCDS de hormigón	8,18%
Total escombros general/año	522 000,00 m ³	Disminución del total de los RCDS	1,88%

Fuente: Elaboración propia, 2015

Si utilizáramos el árido reciclado para la elaboración de hormigón reciclado estructural en vigas y columnas en las construcciones del déficit habitacional en Cercado, del total de RCDs generados anualmente (de los cuales 9 836,84 m³ son escombros de hormigón), podremos reducir la contaminación general de residuos en un 1,88 % y del total de escombros específicos de hormigón en un 8,18 %.

c) Cantidad de materiales de agregado grueso natural no utilizado en Cercado

Tabla N°9. Aplicación del% 20 sustitución AGR

Datos	Cantidades	Utilización	Porcentaje
Hormigón vaciado	1,00 m ³	Contiene árido reciclado	0,147 m ³
Árido grueso natural	0,61 m ³	Contiene árido reciclado suelto	0,147 m ³
Árido grueso	0,61 m ³	Contiene árido reciclado suelto	24%

Fuente: Elaboración propia, 2015

Además del total de agregado grueso natural utilizado en los hormigones, la sustitución del 20 % en peso representa el 24 % del volumen total del hormigón vaciado. Es decir, dejaríamos de utilizar áridos

gruesos naturales en una cuarta parte menos de lo que se explota en la actualidad.

CONCLUSIONES

La propuesta de aplicación del hormigón reciclado, para su uso de la vivienda ecológica, sí es posible y se justifica bajos los siguientes datos obtenidos finales:

A nivel tecnológico

Resultados de laboratorio

Los áridos reciclados puros no son aptos para su utilización, debiendo realizarse la corrección granulométrica para la realización de las combinaciones por sustitución en peso, siendo estos aptos para su utilización.

La elevada absorción del ARG (de hasta 263,4 %) hace necesario realizar correcciones en la relación agua-cemento.

La sustitución del 20 % de árido reciclado por árido natural logra una resistencia promedio 223,27 kg/cm², siendo superior en un 106,31 %.

El árido reciclado, por su condición de ser chancado y su proceso de demolición, presenta formas anguladas ("aristas vivas") de formas irregulares, lo que le da la condición mayor y mejor adherencia en el uso de este material.

El incremento de la resistencia en los hormigones reciclados se justifica como consecuencia de la elevada absorción de agua de la pasta de cemento por parte de los áridos reciclados, la cual modifica la relación agua-cemento al interior de la mezcla, como consecuencia disminuye la cantidad de agua, elevando la resistencia.

Vigas Prototipo a escala real

El elemento estructural de vigas se caracteriza por las siguientes propiedades:

- a) La resistencia a la compresión es superior a H21 {210 kg/cm²}, llegando a 248,17 kg/cm², alcanzando al 118,17% de mayor de resistencia.
- b) El hormigón reciclado es más liviano por tener un menor peso específico, mucho menor que el agregado grueso natural, siendo -66 % menor su peso; esto representaría con la sustitución del 20 % un peso más ligero de -11,0-13,20 % del total del hormigón vaciado, lo que traería beneficios en el cálculo de las secciones de hormigón y cálculo en secciones de fierro.
- c) En la construcción se emplea el mismo método tradicional, lo que no influye en los procesos, ni en los costos de construcción, especialmente de mano de obra. No requiere otro tipo de trabajos adicionales o manejos diferentes en los vaciados de hormigón, sino más bien es de tipo "clásico".
- d) Las vigas vaciados *in situ* (después de 4,5 meses la fecha) no presentan ningún tipo de deterioro significativo.
- e) Las pruebas de carga nos muestran que la viga tiene una deflexión que está dentro las márgenes de cálculo, por lo que su comportamiento de trabajo es óptimo. Una vez retirada la carga, la viga vuelve a su estado inicial hasta en un 98,1 %.

A nivel ecológico

Disminución de la contaminación por RCD

La explotación y acceso a los residuos de construcción son realizadas a cielo abierto. Se tiene abundante cantidad de "materia prima" en yacimientos ubicados en el entorno urbano de la ciudad, al cual se accede con facilidad.

Si se utiliza el árido reciclado, para la elaboración de hormigón reciclado estructural en vigas y columnas en las construcciones aprobadas en el Cercado y las construcciones del déficit habitacional del total de RCDs, se podrá reducir la contaminación general de residuos de un 2,70 % y del total de escombros específicos de hormigón de un 11,73 %; por lo cual el total del agregado grueso natural utilizado en los hormigones (con la sustitución del 20 % en peso) representa el 24 % del volumen total del hormigón vaciado. Esto implica que se dejaría de utilizar áridos gruesos naturales en una cuarta parte menos que se dejarían de explotar en la actualidad.

A nivel económico

Parámetros de costos

El costo del árido reciclado producido en forma artesanal es de 281,86 Bs/m³, siendo más elevado en 256,23 % y el costo de este árido con sustitución del 20 %, aplicado al precio unitario, es de 1,34 % más alto.

El precio unitario es mayor en un 1,34-3,90 % (comparado con el hormigón convencional) y el costo total aplicado a la construcción de la vivienda tiene un incremento general del costo total de la obra de +0,68 % y +0,88 % mayor, de acuerdo con la vivienda modelo.

Partiendo de la futura industrialización de los procesos y los costos de producción masiva de los áridos reciclados, se disminuirán los costos finales de producción socioeconómica.

Para la producción del agregado reciclado artesanal no se requiere mano de obra calificada y se tiene disposición a cielo abierto de grandes cantidades de RCD, con lo que se constituye en una alternativa de fuentes de trabajo

Si se procesan los 120 268,8 m³ de escombros de hormigón generados anualmente en Cercado, se tendría un movimiento económico anual de Bs.- 33 898 963,96 = 4 842 709,13 dólares anuales, lo que representa un movimiento económico mensual de 403 559 dólares/mes. Si la cantidad fuera de 4 273,14 m³ de escombros de hormigón necesarios para su utilización en las construcciones aprobadas en Cercado, se obtendría un movimiento económico anual de Bs.- 1204427,24 = 172 061,03 dólares anuales, lo que representa un movimiento económico mensual de 14 338 dólares /mes.

Futuras líneas de investigación

Niveles de investigación posterior

Evaluar el desempeño durable de hormigones reciclados, que pueden ser expuestos a ambientes muy

agresivos, podría afectar al hormigón con el tiempo.

La condición de ser un hormigón más ligero, por ser este más poroso, hace suponer una posibilidad de aislamiento térmico, que podría ser interesante estudiarla a futuro.

Se deberán hacer estudios respecto a la calidad, procedencia (desconocida y conocida) y resistencia original de la materia prima del escombros para averiguar en qué forma puede afectar a la resistencia final del hormigón reciclado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Estrela, E. (2012). Las 3-5 erres: reutilizar, reducir, reparar, reciclar y regular. España: Hablando de ciencia. Recuperado de: <http://www.hablандeciencia.com/articulo/los/2012/10/18/las-5-erres-reutiliza-reduce-repara-recicla-y-regula/>
- 2) Rodríguez, G. (2010). La generación de residuos sólidos de obras civiles del área urbana de Cochabamba por zonas y distritos. Cochabamba, Bolivia: SGAB. Pag. 20-35-41.
- 3) López, F. (2008). Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas. Tesis para optar al grado de Doctor, Real Universidad de España. Ciudad de Gijón, España. p. 158
- 4) Redacción Central (2011). Precios de materiales se elevan. Cochabamba, Bolivia: Los Tiempos. Recuperado de: <http://www.lostiempos.com/actualidad/economia/20110605/precios-materiales-se-elevan>
- 5) Instituto Nacional de Estadística (2011). Censo Nacional de Población y Vivienda 2012. Bolivia: Publicación Cartillas INE. p.7-8.
- 6) Sociedad de Gestión Ambiental Boliviana (2011). La generación de residuos sólidos de obras civiles del área urbana de Cochabamba. Bolivia: SGAB. p. 8
- 7) Universidad Mayor de San Simón (2005). Inundaciones en el valle de Cochabamba, impactos ambientales y efectos socio económicos Cochabamba: UMSS.
- 8) Guijarro, C. (2008). Influencia de variación de parámetros de dosificación, para hormigones reciclados. Tesis para optar al grado de Doctor. Universidad de Oviedo, España. Pag. 16.
- 9) Universidad de la Plata (2009). Manual de Directrices para el Uso de Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad. Argentina: Editorial La Plata

Bibliografía consultada

- 1) Avenburg, E. (1972). Resistencia de materiales. Buenos Aires, Argentina: Ediciones Pannedille.
- 2) Chandias, M. y Ramos, JM. (2004). Cómputos y presupuesto. (19va Ed.). Buenos Aires, Argentina: Editorial Alsina.
- 3) Gaceta Oficial De Bolivia (1992). Reglamento Ley N° 1333 del medio ambiente, gestión de residuos sólidos. La Paz, Bolivia: Honorable Congreso Nacional.
- 4) Gobierno Autónomo Municipal De Cochabamba (2002). Reglamento Municipal para la gestión integral de residuos sólidos domiciliarios y asimilables, O.M. 2861/02. Cochabamba, Bolivia: GAMC
- 5) Martinel, A. (2007). Los residuos sólidos, como potencial del desarrollo económico local, Concurso RIDELC. Cochabamba, Bolivia: RIDELC.
- 6) Ministerio De Medio Ambiente y Aguas (2010). Guía Técnica para el Aprovechamiento de Áridos en Cauces de Ríos y Afluentes. La Paz, Bolivia: Ministerio De Medio Ambiente y Agua.
- 7) Jiménez, P., García, A. y Morán F. (2011). Hormigón armado. (15va Ed.). Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili.

- 8) Rodríguez, G. (2010). La generación de residuos sólidos de obras civiles del área urbana de Cochabamba por zonas y distritos. Estudio diagnóstico SGAB. Cochabamba, Bolivia: SGAB -
- 9) Salvador, P. (2005). La Planificación verde de las ciudades. (1era ed. 2da tirada) Barcelona: España: Editorial Gustavo Gili SA.

Fuentes de financiamiento: Esta investigación fue financiada con fondos de los autores. **Declaración de conflicto de intereses:** Los autores declaran que no tiene ningún conflicto de interés.

Copyright (c) 2018 César Rojas Montaña



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](#).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)