


Tipo de artículo Proyecto de Ingeniería Aplicada

# Análisis y proyección de la resistencia a compresión del concreto, utilizando agregados finos y gruesos de los residuos de construcción y demolición (RCD) de la planta piloto de EMAVERDE

Analysis and projection of the compressive strength of concrete, using fine and coarse aggregates of construction and demolition waste (CDW) from the EMAVERDE pilot plant.

 Rodolfo Angel Aliaga Choque<sup>1</sup>

1. Ingeniero Civil, Docente Tiempo Completo. Universidad Privada del Valle, La Paz, Bolivia.  
[raliagac@univalle.edu](mailto:raliagac@univalle.edu)

## RESUMEN

En esta investigación se analiza los resultados de la incorporación de agregados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) procesados en la primera planta piloto de transformación de RCD de Bolivia, ubicada en la ciudad de La Paz, y su incorporación a una nueva mezcla con agregados chancados naturales, además de su proyección a mayores porcentajes de sustitución, para proponer una fórmula que pueda predecir su comportamiento. El agregado natural fue sustituido en porcentajes de 0%, 30% y 60% por agregado grueso RCD, realizándose un total de 45 probetas, además se realizaron probetas sustituyendo parcialmente el agregado fino en proporciones de 0%, 25%, 50%, realizándose 51 probetas, los agregados naturales utilizados fueron caracterizados y verificados para su empleo en hormigones, las probetas realizadas fueron ensayadas a compresión a los 7, 14 y 28 días. Los resultados muestran que se puede alcanzar una resistencia a la compresión máxima de 25.35 MPa en caso de reemplazar un 13 % de agregado grueso RCD, y en caso de reemplazar el 23% de agregado fino RCD se puede llegar a una resistencia máxima de 22.8 MPa, por lo que con la presente investigación demostró la posibilidad de alcanzar valores mayores al de un diseño de resistencia característica (H21) y se recomienda realizar más estudios experimentales en la línea de investigación.

**Palabras clave:** RCD, Agregados reciclados. Medio Ambiente.

## ABSTRACT

This research analyzes the results of the incorporation of aggregates from construction and demolition waste (CDW) processed in the first pilot CDW transformation plant in Bolivia, located in the city of La Paz, and its incorporation into a new mixture. with natural crushed aggregates, in addition to its projection at higher substitution percentages, to propose a formula that can predict its behavior. The natural aggregate was replaced in percentages of 0%, 30% and 60% by RCD coarse aggregate, making a total of 45 specimens. In addition, specimens were made partially replacing the fine aggregate in proportions of 0%,

**Citar como:** Aliaga, R. A. Análisis y proyección de la resistencia a compresión del concreto, utilizando agregados finos y gruesos de los residuos de construcción y demolición (RCD) de la planta piloto de EMAVERDE. *Journal Boliviano De Ciencias*, 19(54). 115-131 <https://doi.org/10.52428/20758944.v19i54.1010>

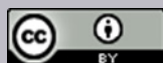
**Revisado:** 18/09/2023

**Aceptado:** 20/11/2023

**Publicado:** 20/12/23

**Declaración:** Derechos de autor 2023 Rodolfo Angel Aliaga Choque, Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



25%, 50%, making 51 specimens, the natural aggregates used were characterized and verified for their use in concrete, the specimens made were compression tested after 7, 14 and 28 days. The results show that a maximum compressive strength of 25.35 MPa can be achieved in case of replacing 13% of RCD coarse aggregate, and in case of replacing 23% of RCD fine aggregate a maximum strength of 22.8 MPa can be reached. , so with the present investigation the possibility of reaching values higher than that of a characteristic resistance design (H21) and it is recommended to carry out more experimental studies in the line of research.

**Keywords:** RCD, Recycled aggregates, Environment.

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el departamento de La Paz ha experimentado un crecimiento en la construcción de edificios altos, lo que requiere una constante demolición de casas, por lo que la generación de escombros es depositados en los lechos de los ríos (Swissinfo, 2021). Actualmente las ciudades de La Paz y El Alto – Bolivia, presentan un crecimiento en tamaño y población, por lo que su desarrollo implica que la tecnología y la construcción se encuentren vinculados para lograr un desarrollo adecuado. Debido al constante crecimiento, es preciso concientizar la explotación desmedida de los recursos naturales e impulsar una gestión de reciclaje, aprovechando los residuos de las construcciones y demoliciones que comúnmente son depositados en los ríos y quebradas de la ciudad, generando así un impacto ambiental negativo (Pereira, 2019).

Antes de la pandemia (COVID-19) se estimaba que la ciudad generaba alrededor de 1.400 toneladas de RCD a diario, ante lo cual, el municipio junto con el apoyo de la cooperación italiana (Cooperazione Internazionale), montó una planta piloto para tratar 60 toneladas por día (Swissinfo, 2021). Con estos alarmantes índices, la Secretaría Municipal de Gestión Ambiental (SMGA) consolidó el proyecto de una planta piloto de transformación de residuos de construcción y demolición, a través de una alianza estratégica con la cooperación italiana ‘Cooperazione Internazionale’ (AMUN, 2021). La planta se encuentra en el barrio de Aranjuez, en la zona sur paceña, en un espacio dentro del vivero municipal (Swissinfo, 2021). Este material producido por la planta es el material base de estudio para la presente investigación.

El objetivo de esta investigación es analizar y proyectar la resistencia a compresión del concreto reutilizando los residuos de construcción y/o demolición (RCD), producidos en la nueva planta de EMAVERDE de la ciudad de La Paz, con un reemplazo del 25 y 50 % para agregado fino además de un 30 y 60 % para el agregado grueso.

### Hipótesis

La resistencia a compresión de un hormigón convencional es la misma que un hormigón que tiene incorporación de RCD de agregado fino y grueso como reemplazo de agregado convencional.

### Hipótesis nula

La resistencia a compresión de un hormigón convencional no es la misma que un hormigón que tiene incorporación de RCD de agregado fino y grueso como reemplazo de agregado convencional.

### Hipótesis alternativa

La resistencia a compresión de un hormigón convencional es la misma que un hormigón que tiene incorporación de RCD para ciertos porcentajes de adición con agregado grueso y para otros porcentajes con agregado fino.

En el artículo “Revisión del estado del arte de las normas y especificaciones actuales relativas a los agregados reciclados de RCD” de Alberte & Handro (2021), se menciona que, si bien se tienen normativas para este procedimiento, el uso de RCD sigue siendo una técnica nueva en ese país, y se hace una recopilación de normativas de distintos países.

Estados Unidos también fue uno de los países pioneros en este tema. Según Alfonso (2005), después de 1982, las normas americanas para pavimentos y hormigones presentan ahora condiciones para el reciclaje de RCD.

En Brasil, la gestión de RCD comenzó unas seis décadas después de Europa (MELO, 2011). En 1991, fue implementado en São Paulo la primera planta de reciclaje de DMC en América Latina. Sin embargo, sus actividades se cerraron en 2002, sin el rango máximo de capacidad de producción.

Dentro de la revisión bibliográfica se observa el reciclaje y la recuperación en países, como Brasil, España, Japón y los Países Bajos, que presentaron valores de 6%, 14%, 81% y 98%, respectivamente. Tal variación se atribuye en el estudio a características particulares de cada país, tales como suministro de materiales de construcción y RCD, disponibilidad de lugares para la deposición y restricciones de las normas, entre otros factores (Alberte & Handro, 2021). En la investigación mencionada se analiza las normativas de otros países en cuanto al uso de RCD, en donde se puede resumir que existen normativas para el uso de este material en Países como: Brasil, Alemania, Austria, Australia, Bélgica, España, Estados Unidos, Holanda, China, Inglaterra, Japón y Suiza. Siendo un estudio publicado el 2021, se hace notar la relevancia de poder contar con una planta trituradora para poder realizar este tipo de investigaciones, se hace notar también que no se tiene aún normado el uso de este material RCD en países de Latinoamérica.

Con experiencias en Latinoamérica, Letelier en el artículo “Áridos reciclados de hormigón con captura de CO<sub>2</sub>” se menciona que a mayor porcentaje de reemplazo de áridos reciclados los estudios demuestran que el comportamiento mecánico o de durabilidad se ve afectado disminuyendo a medida que se aumenta el reemplazo sin embargo con la incorporación de CO<sub>2</sub> esto se puede absorber (Hormigón al día, 2023).

Para el presente artículo, dadas las condiciones de la nueva planta de EMAVERDE, resulta un aporte importante mostrar los resultados obtenidos en laboratorio y poder recomendar porcentajes óptimos de sustitución al usar el agregado grueso y fino de esta planta.

## 2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la presente investigación se realizó una compilación de datos recabados de laboratorio que incluyen, la resistencia a compresión del concreto, pesos específicos de los agregados nuevos y los agregados RCD analizados.

### Lugar de estudio

Todas las probetas analizadas fueron elaboradas en ambientes de los laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Privada Del Valle entre las gestiones 2021 y 2022, en la ciudad de La Paz, Bolivia.

PLANTA PILOTO. - La generación de RCD en la ciudad de La Paz llegó a ser de gran magnitud cuando la construcción estaba en mayor crecimiento, hoy en día, aunque la tasa de construcción se haya reducido, aún se generan RCD, donde en muchos casos no se cuenta con medidas de protección ambiental, el cual genera el manejo de este tipo de residuos.

“Hormigones y baldosas son algunos de los productos que se fabricarán en la primera planta de Bolivia de transformación de residuos de construcción y demolición que inauguró este jueves el alcalde Luis Revilla. Tendrá una producción de 64 toneladas por día y permitirá reciclar este tipo de materiales, reutilizarlos y coadyuvar a la mejora del medio ambiente” (AMUN, 2021).

Esta planta piloto fue consolidada por la secretaria municipal de gestión ambiental (SMGA), y la cooperación italiana “Cooperazione Internazionale” (COOPI), y fue financiado con un monto de Bs 1,662,000.00, y se encuentra ubicado en el vivero de Aranjuez (AMUN, 2021) (Figura 1).



**Figura 1.** Planta piloto de transformación de residuos RCD,

**Fuente:** AMUN, 2021

## PREPARACIÓN DE LOS AGREGADOS

El municipio coordina con empresas constructoras o constructores particulares interesados en entregarles los RCD que hubieran generado. El lugar recibe ladrillos, concreto, hormigón y cemento, nada de metales ni madera, ya que el tratamiento consiste básicamente en convertir los materiales en áridos. Una vez que llegan al lugar, los RCD pasan por minuciosas clasificaciones para separar todo lo que no sea escombros e ingresar luego a un molino de trituración. El material llega a otra cinta con un sistema de imanes para retirar los residuos metálicos más pequeños y avanza hacia un sistema de criba donde se vuelve a seleccionar el material para finalmente entrar a un molino de dientes. El resultado se separa en tres subproductos según el diámetro, los más grandes vuelven a ingresar a la planta y los otros dos están listos para su reuso (Swissinfo, 2021).

En entrevista con los responsables del funcionamiento de la planta de trituración de agregados (Oct, 2023), se constató que antes de procesar los agregados de RCD y recepcionar los materiales, se decide si este material a ser procesado es factible para su uso posterior o si este tiene muchas impurezas, los materiales procesados son acopiados según su origen y de esta manera pueden decidir en que tipos de obras se podrá utilizar.

### CEMENTO

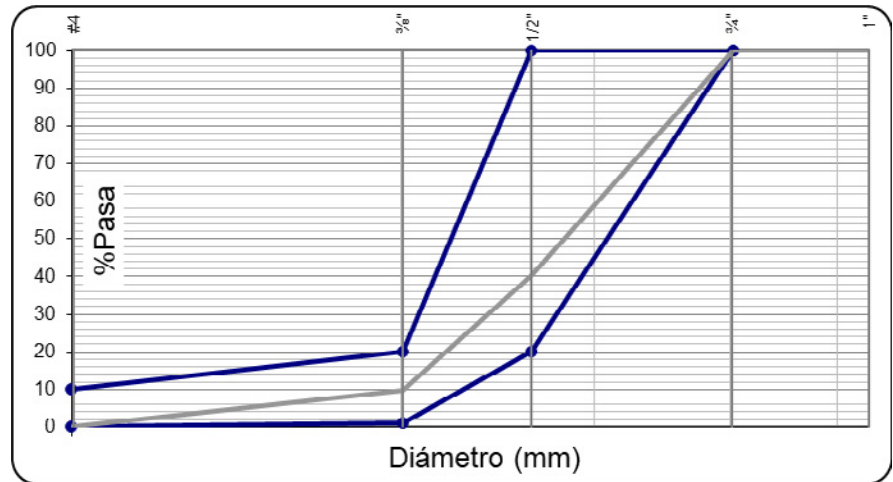
Para la presente investigación se empleó el cemento Viacha IP-40, este se caracteriza por tener Puzolana en un porcentaje máximo del 30%, y su resistencia mínima a los 28 días es de 40 MPa, este cemento fue utilizado para ambas etapas, tanto como cuando se reemplazó el agregado fino como el agregado grueso.

### MUESTRA

Se elaboraron en total 45 probetas cilíndricas de hormigón donde se reemplazó el agregado fino en un 25% y 50% por RCD, y por otro lado se elaboraron 51 probetas cilíndricas de hormigón donde se reemplazó el agregado grueso en un 30% y 60% por RCD. La resistencia característica proyectada en ambos casos fue de 21 MPa.

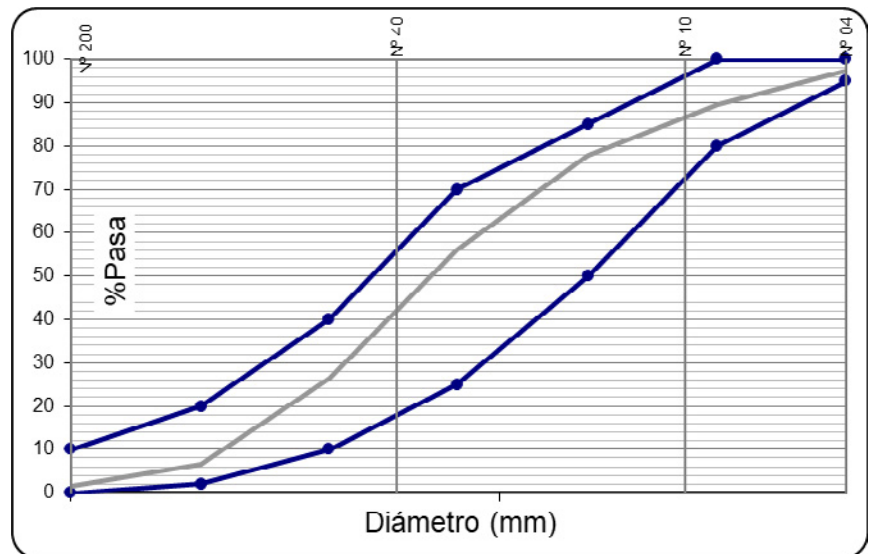
Para lograr una dosificación adecuada y llegar a la resistencia característica necesaria, se realizaron los ensayos de granulometría según la norma C136/C136M-19 (ASTM, 2020), donde se evidencia el cumplimiento tanto para el agregado grueso (TMN ½”) como para el agregado fino tal como se muestra en la Figura 2 y 3.

**Figura 2.** Curvas granulométricas del agregado virgen grueso



Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Rodríguez y Aliaga (2023)

**Figura 2.** Curvas granulométricas del agregado virgen fino.



Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Rodríguez y Aliaga (2023)

De la misma manera, para poder realizar la dosificación según la normativa 211.1-18 (ACI, 2018) de los materiales es necesario conocer los pesos específicos de la muestra, para los materiales analizados se obtuvieron los resultados presentes en la Tabla 1.

**Tabla N° 1.** Datos para Dosificación con RCD (3/4")

MATERIAL	Peso específico (g/m <sup>3</sup> )	%Hum	%Abs	Peso Unitario compactado (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Unitario Suelto (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	1.00				
Cemento	3.03				
Grava	2.21	0.294	1.36	1450	1352
Arena	2.54	3.248	3.95	1566	1361
RCD (3/4")	2.30	2.501	6.62	1208	1152

**Fuente:** Elaboración propia en base a resultados de Quispe y Aliaga (2022)

De la misma manera para lograr la dosificación de la mezcla RCD fino con agregado natural (Tabla 2).

**Tabla N° 2.** Datos para Dosificación con RCD (arena)

MATERIAL	Peso específico (g/m <sup>3</sup> )	% Humedad	% Absorción	Peso Unitario compactado (kg/m <sup>3</sup> )	Peso Unitario Suelto (kg/m <sup>3</sup> )
Agua	1.00				
Cemento	3.02				
Grava (1/2")	2.80	0.33	2.38	1456	1344
Arena	2.55	0.42	4.48	1685	1415
RCD (Arena)	2.82	0.15	5.46	1519	1372

**Fuente:** Elaboración propia en base a resultados de Rodríguez y Aliaga (2023)

Con los datos mostrados se procedió a dosificar la mezcla según los parámetros solicitados por la ACI 211. Las Tablas 3, 4 y 5 muestran los resultados de esta dosificación empezando con los materiales utilizados cuando se sustituye la grava por RCD.

**Tabla N° 3.** Cantidad en kg/m<sup>3</sup> para la dosificación utilizando RCD grava

Dosificación	Cemento	Arena	Grava	RCD (grava)
	Kg	Kg	Kg	Kg
H° Convencional	463.36	568.96	848.64	0
H° con 70% Agregado Natural y 30% RCD Grueso	463.36	568.96	594.49	264.5
H° con 40% Agregado Natural y 60% RCD Grueso	463.36	568.96	508.3	354.2

**Fuente:** Elaboración propia en base a resultados de Quispe y Aliaga (2022)

De la misma manera también se muestran los resultados cuando se sustituye la arena por RCD.

**Tabla N° 4.** Cantidad en kg/m<sup>3</sup> para la dosificación utilizando RCD arena

DOSIFICACION	Cemento Kg	Arena Kg	Grava Kg	RCD (arena) Kg
H° Convencional	463.36	765.76	863.41	0
H° con 75% Agregado Natural y 25% RCD fino	463.36	574.32	863.41	191.44
H° con 50% Agregado Natural y 50% RCD Fino	463.36	382.88	863.41	382.88

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Rodríguez y Aliaga (2023)

Debido a los requerimientos para dosificación de hormigones, también se presenta los resultados del ensayo de asentamiento para los 6 tipos de mezclas analizadas.

**Tabla N° 5.** Resultados de asentamiento y relación agua cemento adoptada

DOSIFICACION	Asentamiento	Relación a/c
Hormigón patrón 1	4	0.464
Hormigón con RCD ¾” al 30%	4	0.464
Hormigón con RCD ¾” al 40%	6	0.464
Hormigón patrón 2	4	0.464
Hormigón con RCD Arena al 25%	6	0.464
Hormigón con RCD Arena al 50%	6.7	0.464

Fuente: Elaboración propia.

### PROYECCION DE LOS RESULTADOS

La investigación presentada se desarrolló por medio del método deductivo, partiendo de hechos particulares o concretos para la obtención de conclusiones generales, así mismo para una conformación y aceptación de los valores experimentales se usará el análisis de varianzas ANOVA para la validación de los resultados.

### 3. RESULTADOS

A momento de realizar el vaciado y desencofrado de las estructuras, resulta de interés conocer cómo va evolucionando la resistencia del concreto a los 7 días, por ello se presentan en las Tablas 6 y 7 los resultados de la resistencia a compresión del concreto a esta edad.



**Tabla N° 6.** Resultados del ensayo de resistencia a compresión a 7 días sustituyendo el agregado fino con RCD

Tipo de hormigón	kg/cm <sup>2</sup>	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (MPa)	RCD
H° Convencional	167.09	166.15	16.3	0
	174.05			
	162.36			
	155.42			
	173.24			
	164.72			
	166.18			
H° con 75% Agregado Natural y 25% RCD fino	159.48	159.61	15.7	25
	170.95			
	148.63			
	164.54			
	147.86			
	200.19			
	168.91			
H° con 50% Agregado Natural y 50% RCD Fino	181.29	176.67	17.3	50
	163.34			
	168.34			
	177.97			

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Rodríguez y Aliaga (2023)

**Tabla N° 7.** Resultados del ensayo de resistencia a compresión a 7 días sustituyendo el agregado grueso con RCD

Tipo de hormigón	kg/cm <sup>2</sup>	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (MPa)	%RCD
H° Convencional	243.9	229.72	22.5	0
	215.68			
	229.57			
H° con 70% Agregado Natural y 30% RCD Grueso	185.67	191.44	18.8	30
	205.93			
	182.71			
H° con 40% Agregado Natural y 60% RCD Grueso	128.4	151.43	14.9	60
	184.15			
	141.73			

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Quispe y Aliaga (2022)

A momento de reemplazar el agregado chancado grueso por 30% y 60% de material RCD, y ensayando las probetas a compresión, se obtuvieron los resultados de la Tabla 8.

**Tabla N° 8** Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a 28 días sustituyendo el agregado grueso con RCD

RCD 3/4"	Fecha de elaboración	Fecha de rotura	Edad	Diámetro (cm)	Altura H (cm)	H/D	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Carga de rotura (kg)	Resistencia en kg/cm <sup>2</sup>
Hormigón Convencional	11/10/2021	8/12/2021	28	15.30	30.50	1.99	183.85	12787	42120	229.1
	11/10/2021	8/11/2021	28	15.03	30.00	2.00	177.42	12263	48320	272.34
	11/10/2021	8/11/2021	28	15.25	30.40	1.99	182.65	12650	47030	257.48
Hormigón con 70% Agregado Natural y 30% RCD Grueso	13/10/2021	10/11/2021	28	14.97	30.10	2.01	176.01	12069	44790	254.48
	13/10/2021	10/11/2021	28	15.30	30.50	1.99	183.85	12508	46520	253.03
	13/10/2021	10/11/2021	28	15.00	30.50	2.03	176.71	12379	42420	240.05
Hormigón con 40% Agregado Natural y 60% RCD Grueso	13/10/2021	10/11/2021	28	15.20	30.60	2.01	181.46	12196	33050	182.14
	13/10/2021	10/11/2021	28	15.05	29.95	1.99	177.89	11678	33770	189.83
	13/10/2021	10/11/2021	28	15.25	30.40	1.99	182.65	12098	34420	188.44

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de Quispe y Aliaga (2022)

A momento de reemplazar el agregado chancado fino por 25% y 50% de material RCD, y ensayando las probetas a compresión, siguiendo el ensayo ASTM C-39, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 9.

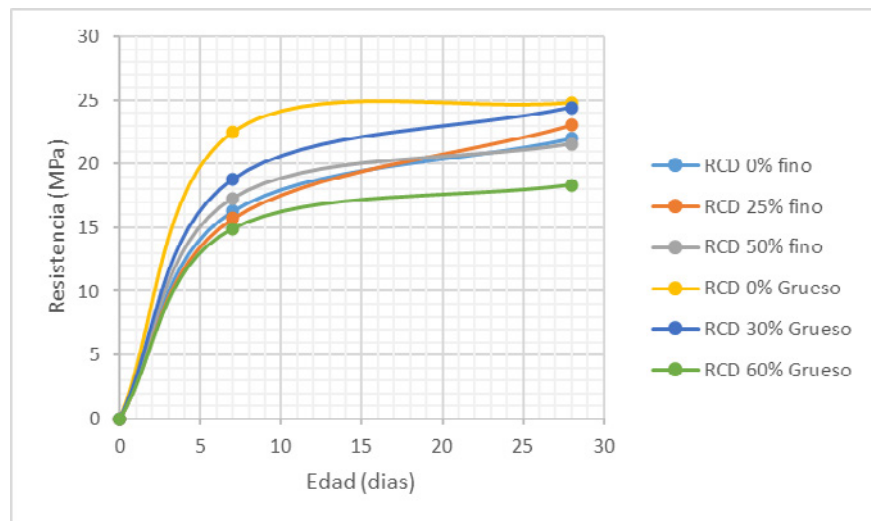
**Tabla N° 9** Resultados del ensayo de resistencia a la compresión a 28 días sustituyendo el agregado fino con RCD

RCD FINO	Fecha de elaboración	Fecha de rotura	Edad	Diámetro (cm)	Altura H (cm)	H/D	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Carga de rotura (kg)	Resistencia en kg/cm <sup>2</sup>
Hormigón Convencional	3/10/2022	31/10/2022	28	15.15	30.15	1.99	180.27	12453	37670	208.96
	3/10/2022	31/10/2022	28	15.20	30.20	1.99	181.46	12356	45550	251.02
	3/10/2022	31/10/2022	28	15.10	30.10	1.99	179.08	12545	39230	219.06
	3/10/2022	31/10/2022	28	15.30	30.30	1.98	183.85	12478	42850	233.07
	3/10/2022	31/10/2022	28	15.10	30.15	2.00	179.08	12256	37240	207.95
	3/10/2022	31/10/2022	28	15.10	30.25	2.00	179.08	12560	40560	226.49
Hormigón con 75% Agregado Natural y 25% RCD fino	5/10/2022	2/11/2022	28	15.10	30.15	2.00	179.08	12643	48620	271.50
	5/10/2022	2/11/2022	28	15.15	30.40	2.01	180.27	12653	45330	251.46
	5/10/2022	2/11/2022	28	15.10	30.10	1.99	179.08	12665	42420	236.88
	5/10/2022	2/11/2022	28	15.30	30.20	1.97	183.85	12626	37790	205.55
	5/10/2022	2/11/2022	28	15.10	30.10	1.99	179.08	12654	38970	217.61
	5/10/2022	2/11/2022	28	15.10	30.25	2.00	179.08	12459	40580	226.60

RCD FINO	Fecha de elaboración	Fecha de rotura	Edad	Diámetro (cm)	Altura H (cm)	H/D	Área (cm <sup>2</sup> )	Peso (g)	Carga de rotura (kg)	Resistencia en kg/cm <sup>2</sup>
Hormigón con 50% Agregado Natural y 50% RCD Fino	10/10/2022	7/11/2022	28	15.10	30.35	2.01	179.08	12524	38280	213.76
	10/10/2022	7/11/2022	28	15.20	30.30	1.99	181.46	11968	45550	251.02
	10/10/2022	7/11/2022	28	15.10	30.15	2.00	179.08	12075	35760	199.69
	10/10/2022	7/11/2022	28	15.15	30.25	2.00	180.27	11998	38170	211.74
	10/10/2022	7/11/2022	28	15.25	30.30	1.99	182.65	12067	37890	207.45
	10/10/2022	7/11/2022	28	15.15	30.10	1.99	180.27	12356	42540	235.98

Fuente: Elaboración Propia en base a resultados de Rodríguez, Aliaga 2023

Es necesario hacer notar que en la presente investigación para un análisis completo se realizaron la rotura de probetas también a 7 y 14 días, que no se muestran en tablas pero que sí ayudaron a validar la evolución de la resistencia a compresión a esas edades como se muestra en el Gráfico 1.



**Gráfico 1** Evolución de la resistencia a compresión usando RCD fino y grueso para 7 y 28 días

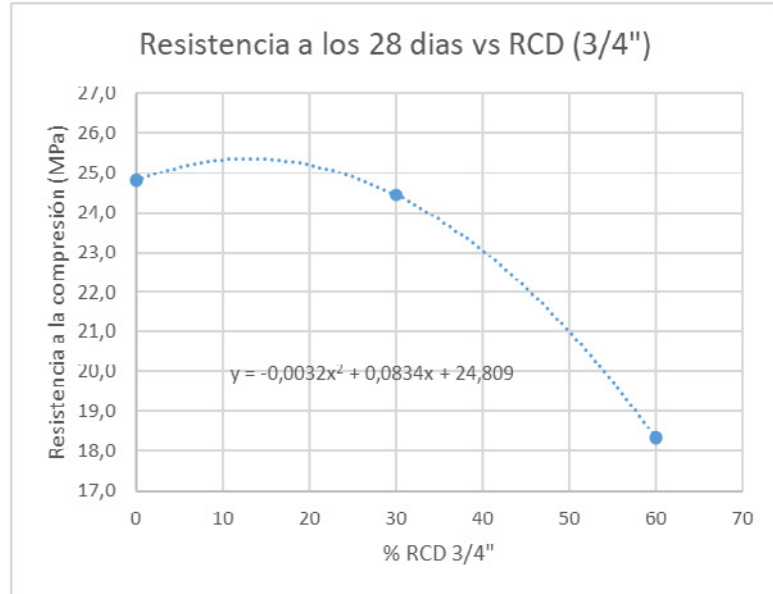
Fuente: Elaboración propia con resultados de Rodríguez y Aliaga (2023) y Quispe y Aliaga (2022)

#### 4. DISCUSIÓN, DESARROLLO Y ANÁLISIS

##### 4.1 Análisis del RCD proveniente del agregado grueso

En el Gráfico 2 se muestran las correlaciones encontradas:

**Gráfico 2.** Resistencia a la compresión a los 28 días vs %RCD (3/4")



Fuente: Elaboración Propia

Siendo que la resistencia de diseño buscada es de 21 MPa, a continuación se realiza un análisis para encontrar el porcentaje de RCD mínimo con el que se obtendría esta resistencia a partir de la ecuación de correlación.

$$y = -0.0032x^2 + 0.0834x + 24.809$$

siendo  $y$ : Resistencia ,  $x$ : %RCD

$$21 = -0.0032x^2 + 0.0834x + 24.809$$

Resolviendo la ecuación se obtiene que, para llegar a una resistencia de 21 MPa, el límite de incorporación de RCD sería de  $\approx 49.9\%$

Entonces si se desea incorporar el agregado grueso proveniente del , lo máximo que se podría utilizar es del RCD  $\approx 50\%$  para llegar a una resistencia de 21 MPa.

Con la misma ecuación encontrada, hallamos el porcentaje de RCD con el que se obtendría la máxima resistencia.

$$y = -0.0032x^2 + 0.0834x + 24.809$$

$$y' = -0.0064x + 0.0834$$

Igualamos a 0

$$-0.0064x + 0.0834 = 0$$

Y resolviendo la ecuación se tiene:

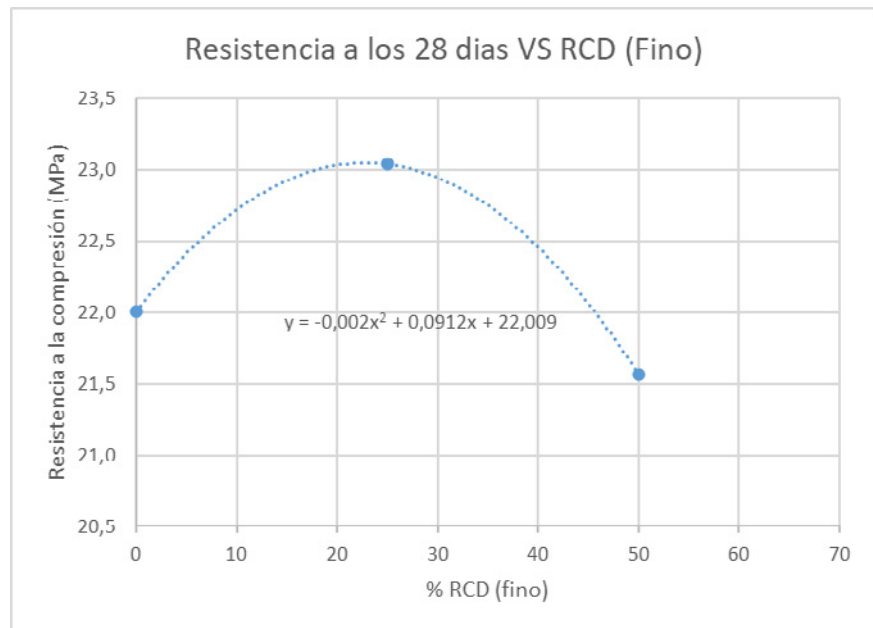
$$x = 13.03\%$$

Entonces para obtener la mayor resistencia a compresión, usando RCD como sustituto del agregado grueso es del 13%, al utilizar este porcentaje se obtendría una resistencia de 25.35 MPa.

#### 4.2 Análisis del RCD proveniente del agregado fino

Las correlaciones encontradas se presentan en el Gráfico 3.

**Gráfico 3.** Resistencia a la compresión a los 28 días vs %RCD (Fino)



Fuente: Elaboración Propia con datos de laboratorio

Siendo que la resistencia de diseño buscada es de 21 MPa, a continuación se hace un análisis para encontrar el porcentaje de RCD mínimo con el que se obtendría esta resistencia a partir de la ecuación de correlación.

$$y = -0,002x^2 + 0,0912x + 22,009$$

siendo  $y$ : Resistencia ,  $x$ : %RCD

$$21 = -0.002x^2 + 0.0912x + 22.009$$

$$x = 54.8\%$$

Se tienen mejores resultados al incorporar el agregado fino que el agregado grueso por lo que en este caso con la ecuación se tendrá una proyección para llegar a la resistencia mínima buscada.

En este caso para llegar a los 21 MPa, se podría utilizar hasta un porcentaje de RCD del 55%.

Analizamos la ecuación obtenida para obtener y aprovechar al máximo el material obtenido.

$$21 = -0.002x^2 + 0.0912x + 22.009$$

Derivamos e igualamos a "0"

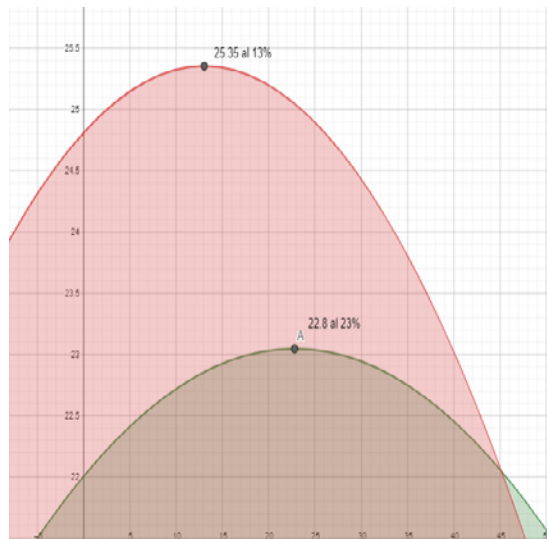
$$-0.004x + 0.0912 = 0$$

Resolviendo

$$x = 23\%$$

Entonces para obtener la resistencia máxima al utilizar el RCD como sustituto del agregado fino es del 23% y con este porcentaje de RCD, se obtendría una resistencia de 22.8 MPa. El Gráfico 4 presenta dicho análisis.

**Gráfico 4.** Calculo de la resistencia máxima (MPa) y % RCD óptimo

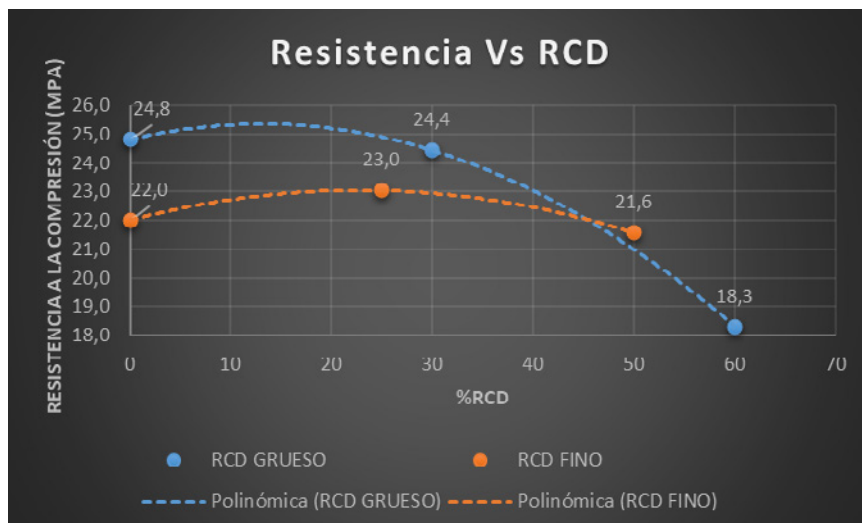


Fuente: Elaboración Propia con datos de laboratorio

### 4.3 Correlación entre análisis

Para realizar un análisis crítico se presenta en el Gráfico 5 ambas correlaciones.

**Gráfico 5.** Cálculo de la resistencia máxima y % RCD óptimo



Fuente: Elaboración propia

De la gráfica anterior y proyectando resistencias se puede obtener que el punto de intersección al 45% presentaría la misma resistencia (22.05) en caso de reemplazar el agregado fino RCD o el agregado grueso RCD, valido para los agregados y cementos estudiados en la presente investigación.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran la influencia en la resistencia a compresión del concreto con la incorporación de RCD proveniente de la trituración de los residuos de demolición que tiene agregado grueso (tamaño máximo nominal de 3/4 de pulgada) y arena (agregado fino), además se logra predecir su comportamiento ante la incorporación de mayor porcentaje de sustitución, los resultados obtenidos y mostrados en este artículo son aplicables para el RCD obtenido en las épocas de estudio y se recomienda seguir estudiando el comportamiento del hormigón ante distintos tipos de RCD, además que para que se tenga un uso masivo de este material, se sugiere que la planta que procesa los agregados, pueda realizar una clasificación de este material a momento de acopiarlo.

Se nota que con una incorporación de 45 %, de RCD ya sea proveniente del agregado fino o grueso, se llegaría a una resistencia de 22.05 MPa mayor a la media esperada (21 MPa), sin embargo dada la variabilidad de los áridos que procesa la planta se recomienda que para futuras investigaciones se comprueben estos resultados experimentalmente, basándose en porcentajes mayores al 10 % al sustituir el agregado grueso o fino RCD.

Para optimizar materiales se tienen las siguientes conclusiones.

- La mayor resistencia que se puede obtener al reemplazar RCD de agregado grueso es de 25.35 MPa sustituyendo el 13.03% de este material.
- La mayor resistencia que se puede obtener al reemplazar RCD de agregado fino es de 22.80 MPa sustituyendo el 23.00% de este material.

Los valores presentados en la presente investigación, permiten tomar decisiones al personal que opera la primera planta piloto de transformación de residuos de construcción y demolición del país ubicada en la ciudad de La Paz, y controlar su producción, debido a que este tipo de plantas, al igual que una chancadora convencional, puede regular la trituración para producir, ya sea más agregado fino o más agregado grueso, es necesario adicionar que resulta primordial el realizar siempre una caracterización de los agregados RCD a medida que se vayan produciendo, ya que para la dosificación de hormigones, es necesario conocer su granulometría, pesos específicos, absorción y porcentaje de humedad, como se mostró en esta investigación.

Dados los porcentajes bajos estudiados en la presente investigación, no se realizó el ensayo de desgaste los ángeles, los resultados de este ensayo tendrán mas relevancia en caso de incrementar los valores de RCD para lo cual se sugiere realizar este ensayo en el agregado reciclado.

En un inicio la administración de la planta piloto de RCD consideraba que los materiales recuperados fueran empleados en hormigones de baja resistencia. Sin embargo, la presente investigación demostró la posibilidad de alcanzar valores mayores al de un diseño de resistencia característica (H21). Por lo que, se recomienda realizar más estudios experimentales en la línea de investigación.

## **6. AGRADECIMIENTOS**

El presente artículo de investigación no hubiera sido posible sin el apoyo del encargado de laboratorio que apoyaron al desarrollo de los tesis durante su estancia en laboratorio y la ejecución de los ensayos en los periodos 2021 y 2022.

También se agradece el apoyo de la planta de Residuos de EMAVERDE por proporcionar el material base para el desarrollo de la presente investigación.

De la misma manera se agradece a las autoridades de la Facultad de Tecnología de la Universidad Privada del Valle por el compromiso con la publicación de artículos que son de interés a nivel nacional.



## 7. REFERENCIAS

ASTM (2020). ASTM C136/C136M-19: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. DOI: [https://doi.org/10.1520/C0136\\_C0136M-19](https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19)

ACI 211.1(2018). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.

AMUN, Agencia municipal de noticias (2021) La primera planta piloto de transformación de residuos de construcción y demolición del país está en La Paz Disponible en: La primera planta piloto de transformación de residuos de construcción y demolición del país está en La Paz | Agencia Municipal de Noticias

AFFONSO, F. J. A (2005). Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros sanitários. Rio de Janeiro, 2005. (Tesis de maestría en Ingeniería Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Alberte, E. P. V., & Handro, J. B.. (2021). Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. Ambiente Construído, 21(3), 305–320. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300553>.

MELO, A. V. S (2011). Diretrizes para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de resíduos da construção civil. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

Rodríguez Ruiz, C.F., Aliaga Choque, R. A., (2023). Estudio de la resistencia a compresión del concreto con reemplazo parcial del agregado fino por residuos de construcción y/o demolición (RCD) [Proyecto de grado, Universidad Privada del Valle]. La Paz

Quispe Céspedes, A.G., Aliaga Choque, R. A., (2022). Análisis de la resistencia a compresión del concreto, reutilizando los residuos de construcción y/o demolición como agregado en distintos porcentajes de sustitución, con y sin aditivo. [Proyecto de grado, Universidad Privada del Valle]. La Paz.

Pereira R. (2019). La Paz inaugura la primera planta de transformación de residuos de construcción. Recuperado el 31 de Octubre de 2023 de: CADECOCRUZ • Cámara de la Construcción de Santa Cruz

Revista hormigón al día N°81 (Julio 2023) [https://issuu.com/ich\\_mkt/docs/had\\_81/10](https://issuu.com/ich_mkt/docs/had_81/10)

Swissinfo (2021). La economía circular se abre campo en La Paz con el reciclaje de escombros

Disponible en: La economía circular se abre campo en La Paz con el reciclaje de escombros - SWI swissinfo.ch