

EXPERIMENTAL EVALUATION OF PARTIAL AGGREGATE REPLACEMENT WITH RECYCLED CONCRETE IN PEDESTRIAN PAVERS

Carlos Elder Rudecindo Calua Carrasco, Ing.¹; Eduen Eli Ruiz Cruzado, Bach.²; Deivi Yoner Bances Fustamante, Bach³

¹ Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca-Perú, carlos.calua@upn.edu.pe

² Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca-Perú, N00032980@upn.pe

³ Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca-Perú, N00016818@upn.pe

Abstract— *Inadequate management of construction and demolition waste (CDW) represents a significant environmental challenge in countries where its reuse remains limited. In this context, the present study experimentally evaluates the influence of partial replacement of fine and coarse aggregates with recycled concrete obtained from rigid pavement demolition on the compressive strength of pedestrian pavers designed for $f'_c = 320 \text{ kg/cm}^2$. An applied quantitative experimental design was implemented, considering a total sample of 72 specimens distributed across four replacement levels: 0%, 5%, 10%, and 15%. Compressive strength tests were conducted in accordance with current standards, and statistical analysis included both descriptive and inferential methods (ANOVA and Tukey tests) to determine significant differences among treatments. The results showed average compressive strengths of 409.73 kg/cm^2 (0%), 404.45 kg/cm^2 (5%), 401.85 kg/cm^2 (10%), and 397.14 kg/cm^2 (15%), with all values remaining above the required design strength. Statistical analysis confirmed that replacement levels up to 15% do not produce critical reductions in mechanical performance. It is concluded that incorporating recycled concrete in Type I pedestrian pavers constitutes a technically viable alternative consistent with NTP 399.611 requirements, contributing to the sustainable valorization of CDW.*

Keywords— *Construction and demolition waste, recycled concrete, concrete, pedestrian paver, compressive strength.*

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL REEMPLAZO PARCIAL DE AGREGADOS POR CONCRETO RECICLADO EN ADOQUINES PEATONALES

Carlos Elder Rudecindo Calua Carrasco, Ing.¹; Eduen Eli Ruiz Cruzado, Bach.²; Eduen Eli Ruiz Cruzado, Bach³

¹ Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca-Perú, carlos.calua@upn.edu.pe

² Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca-Perú, N00032980@upn.pe

³ Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca-Perú, N00016818@upn.pe

Resumen – *La gestión inadecuada de los residuos de construcción y demolición (RCD) constituye una problemática ambiental relevante en países donde su reutilización aún es limitada. En este contexto, el presente estudio evalúa experimentalmente la influencia del reemplazo parcial de agregados finos y gruesos por concreto reciclado proveniente de la demolición de pavimento rígido en la resistencia a compresión de adoquines peatonales diseñados para $f'c = 320 \text{ kg/cm}^2$. Se adoptó un enfoque aplicado con diseño experimental cuantitativo, considerando una muestra total de 72 especímenes distribuidos en cuatro dosificaciones: 0%, 5%, 10% y 15% de sustitución. Los ensayos de resistencia se realizaron conforme a la normativa vigente y el análisis estadístico incluyó pruebas descriptivas e inferenciales (ANOVA y Tukey) para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Los resultados evidenciaron resistencias promedio de 409.73 kg/cm^2 (0%), 404.45 kg/cm^2 (5%), 401.85 kg/cm^2 (10%) y 397.14 kg/cm^2 (15%), manteniéndose todos los valores por encima del diseño requerido. El análisis estadístico confirmó que el reemplazo hasta 15% no genera reducciones críticas en el desempeño mecánico. Se concluye que la incorporación de concreto reciclado en adoquines tipo I constituye una alternativa técnicamente viable y compatible con los requisitos de la NTP 399.611, contribuyendo a la valorización sostenible de RCD.*

Palabras Claves – *Residuos de construcción y demolición, concreto reciclado, concreto, adoquín de uso peatonal, resistencia a compresión.*

I. INTRODUCCIÓN

A nivel global, la industria de la construcción constituye una de las principales generadoras de residuos sólidos, particularmente residuos de construcción y demolición (RCD). Se estima que China produce alrededor de 1,600 millones de toneladas anuales de RCD, mientras que la Unión Europea genera entre 850 y 880 millones de toneladas por año [1]. En respuesta a esta problemática, la UE ha establecido como meta reciclar al menos el 70% de estos residuos con el fin de reducir su impacto ambiental. El concreto, material predominante en la construcción moderna, está compuesto en un 70–80% por agregados naturales, lo que lo convierte en un factor

determinante en el consumo de recursos y la generación de desechos [2], [3]. Asimismo, en países industrializados, el sector construcción representa entre el 30% y 40% del total de residuos sólidos, con tasas de reciclaje que varían considerablemente según el contexto normativo y tecnológico [4]. Se proyecta que la producción mundial de concreto alcance los 18,000 millones de toneladas hacia 2050, lo que incrementará la presión sobre las fuentes de agregados naturales [5]. En América Latina, Brasil reportó en 2022 aproximadamente 120 millones de toneladas de escombros, gran parte de los cuales fueron dispuestos de manera inadecuada [6]. Estudios indican que el 62% de los residuos sólidos urbanos en dicho país provienen del sector construcción, con una tasa de reciclaje cercana al 21% [7], [8]. En el Perú, el Decreto Supremo N° 002-2022-Vivienda regula la gestión de RCD bajo un enfoque de economía circular [9]; sin embargo, en Lima se generaron 3.88 millones de toneladas en 2020, con impactos negativos sobre el suelo, el agua y el aire [10]. En este contexto, la presente investigación propone reutilizar concreto reciclado proveniente de pavimento rígido como sustituto parcial de agregados naturales en adoquines peatonales tipo I, evaluando porcentajes de 0%, 5%, 10% y 15%, con el objetivo de contribuir a la valorización técnica y ambiental de los RCD. En el ámbito nacional, Fernández Pérez [11] investigó el uso de residuos de construcción y demolición en la elaboración de concreto reciclado en Chota, evidenciando que su incorporación representa una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible para reducir la disposición inadecuada de RCD y promover el aprovechamiento de materiales reciclados en la construcción.

II. METODOLOGÍA Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló bajo un nivel aplicativo, orientado a generar conocimiento práctico mediante la intervención directa sobre el problema planteado [12]. Se adoptó un enfoque cuantitativo, basado en la precisión de las mediciones y en un proceso secuencial, deductivo y verificable mediante herramientas estadísticas [13]. El diseño fue experimental con intervención, dado que se manipuló la variable independiente —reemplazo parcial de agregados naturales por concreto reciclado— para evaluar su efecto sobre

la variable dependiente, correspondiente a la resistencia a la compresión de los adoquines, en concordancia con los requisitos de la NTP 399.611 y bajo un enfoque de mitigación ambiental [14]. La población teórica comprende el conjunto total de elementos susceptibles de análisis, mientras que la población objeto de estudio está conformada por las unidades que cumplen criterios específicos de selección [15]. En este trabajo, la población estuvo constituida por 72 adoquines elaborados con niveles de sustitución de 0%, 5%, 10% y 15%. El concreto reciclado empleado provino de la demolición de pavimento rígido en Chota, Cajamarca. La muestra se seleccionó mediante muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando la accesibilidad y disponibilidad de los especímenes [16].

TABLA 1 NÚMERO DE MUESTRAS PARA ENSAYOS DE LABORATORIO				
Edades % de RCD	7 días	14 días	28 días	Absorción
0%	5	5	5	3
5%	5	5	5	3
10%	5	5	5	3
15%	5	5	5	3
Total:	72			

Nota. 60 adoquines, son para los ensayos de resistencia a la compresión y 12 unidades para el ensayo de absorción, sumando un total de 72 especímenes a ensayar.

Material es

Como materiales se ha utilizado agregados naturales, concreto reciclado, cemento, agua, Triplay fenólico y lubricante.

Procedimiento de extracción y ensayos de los agregados La investigación inició con la obtención de materiales, incluyendo concreto reciclado proveniente de la demolición de pavimento rígido en la calle Adriano Novoa (Chota) y agregados naturales extraídos de la cantera Bazán (Cajamarca). El concreto reciclado fue sometido inicialmente a ensayos de resistencia a compresión en corazones diamantinos conforme a la NTP 339.059 / ASTM C39, con el fin de determinar su resistencia original. Posteriormente, el material fue limpiado, triturado y tamizado en el laboratorio de la Universidad Privada del Norte (UPN) para obtener agregados finos y gruesos reciclados. Tanto los agregados reciclados como los naturales fueron caracterizados mediante ensayos de granulometría (NTP 400.012 / ASTM C136), peso unitario (NTP 400.017 / ASTM C29), gravedad específica y absorción (NTP 400.021–022 / ASTM C127–128), y contenido de humedad (NTP 400.010). Con base en estos resultados, el diseño de mezcla se realizó según el método ACI 211.1 para la mezcla patrón y para las sustituciones del 5%, 10% y 15%. Los adoquines fueron fabricados en tandas de 18 unidades por tratamiento, controlando la consistencia mediante ensayo de slump. Tras el moldeo, desmoldeo y curado, se realizaron ensayos de variación dimensional, absorción y resistencia a compresión conforme a la NTP 399.611.

III. RESULTADOS

Caracterización de los agregados.

Como caracterización de los agregados, en el laboratorio de la UPN se realizó todos los ensayos necesarios para poder elaborar el diseño de mezcla por la metodología ACI 211.1, los resultados se aprecian a detalle en las tablas 2, 3, 4 y 5.

TABLA 2 RESUMEN DE LOS ENSAYOS PARA AGREGADO FINO NATURAL		
Resumen ensayos en agregado fino natural		
RCD fino	Unidad	Valor
Módulo de Finura		2.94
Peso Seco Compactado	Kg/m³	1509.68
Peso unitario suelto	Kg/m³	1339.07
Peso específico	g/cm³	2.58
Absorción	%	1.54
Contenido de Humedad	%	7.57

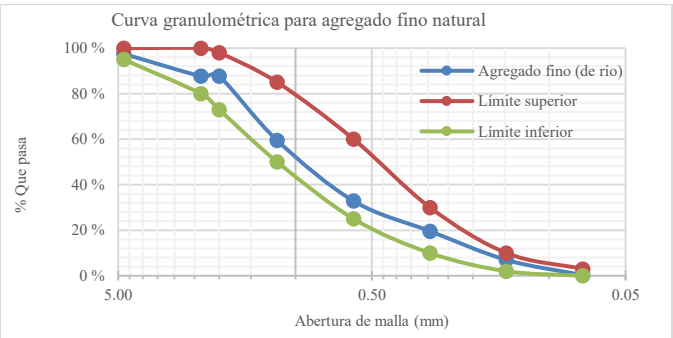


Fig. 1 Curva granulométrica ag. fino natural.

TABLA 3 RESUMEN DE LOS ENSAYOS PARA AGREGADO FINO NATURAL		
Resumen ensayos en agregado grueso natural		
RCD fino	Unidad	Valor
Módulo de Finura		6.64
TMN		¾"
Peso Seco Compactado	Kg/m³	1529.75
Peso unitario suelto	Kg/m³	1391.4
Peso específico	g/cm³	2.61
Absorción	%	2.04
Contenido de Humedad	%	3.33

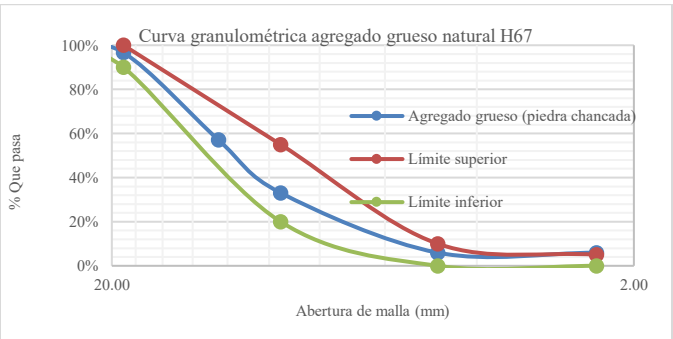


Fig.2 Curva granulométrica agregado grueso natural.

TABLA 4
RESUMEN DE LOS ENSAYOS PARA AGREGADO FINO RECICLADO

Resumen ensayos en RCD fino		
RCD fino	Unidad	Valor
Módulo de Finura		3.07
Peso Seco Compactado	Kg/m ³	1454.48
Peso unitario suelto	Kg/m ³	1330.47
Peso específico	g/cm ³	2.19
Absorción	%	2.54
Contenido de humedad	%	4.9

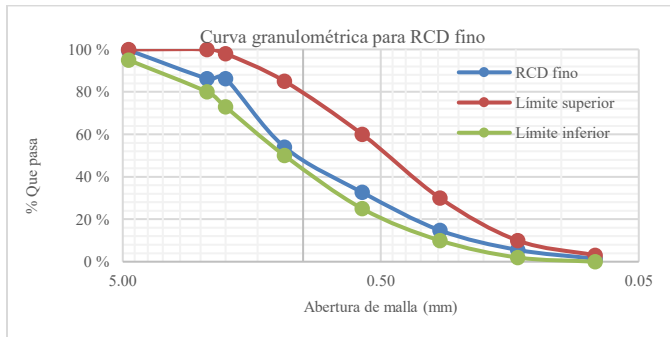


Fig. 3 Curva granulométrica RCD fino

TABLA 5
RESUMEN DE LOS ENSAYOS PARA AGREGADO FINO NATURAL

Resumen ensayos en RCD grueso		
RCD fino	Unidad	Valor
Módulo de Finura		6.59
TMN		¾"
Peso Seco Compactado	Kg/m ³	1309.68
Peso unitario suelto	Kg/m ³	1178.49
Peso específico	g/cm ³	2.56
Absorción	%	5.79
Contenido de Humedad	%	3.21

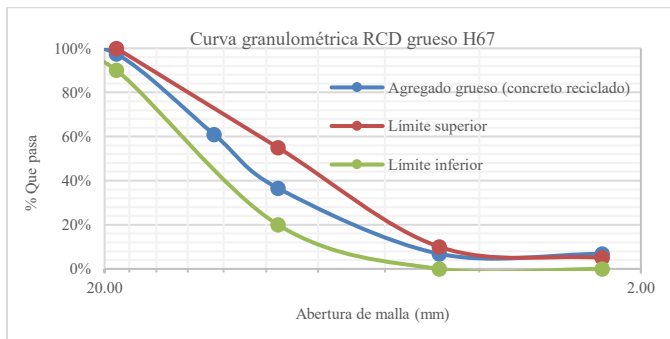


Fig. 4 Curva granulométrica RCD grueso

Diseño De Mezcla ACI 211.1 f'c 320 Kg/cm².

Para obtener una mezcla que posea el nivel adecuado de manejabilidad, y que, al endurecerse a la velocidad esperada, alcance la resistencia y durabilidad necesarias según su propósito de uso. En esta investigación se aplicó el ACI 211.

TABLA 6
DISEÑO DE MEZCLAS PARA MUESTRAS PATRÓN

Materiales	Muestra patrón (Kg/m ³)	
	100% Ag. Naturales	100% Ag. Reciclados
Cemento	481.221	481.221
Agua efectiva	151.734	208.649
Agregado fino húmedo	736.519	--
Agregado grueso húmedo	958.664	--
RCD fino	--	727.742
RCD grueso	--	802.016
Relación A/C de diseño		0.426
Relación A/C efectiva	0.315	0.434

TABLA 7
PROPORCIONES DISEÑO PATRÓN 100% AG. NATURALES

Proporción en peso			
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua
1.00	: 1.53	: 1.99	: 13.40 L/bolsa
Proporción en volumen aparente			
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua
1.00	: 1.52	: 1.95	: 13.40 L/bolsa
Proporción en latas por bolsa de cemento			
Cemento	A. Fino	A. grueso	Agua
1.00 Bolsa	: 3.04	: 3.91	: 13.40 L/bolsa

TABLA 8
PROPORCIONES DISEÑO PATRÓN 100% RCD

Proporción en peso			
Cemento	RCD fino	RCD grueso	Agua
1.00	: 1.51	: 1.67	: 18.43 L/bolsa
Proporción en volumen aparente			
Cemento	RCD fino	RCD grueso	Agua
1.00	: 1.56	: 1.91	: 18.43 L/bolsa
Proporción en latas por bolsa de cemento			
Cemento	RCD fino	A. grueso	Agua
1.00 Bolsa	: 3.12	: 3.82	: 18.43 L/bolsa

Diseño de mezclas experimentales.

Para obtener las cantidades de las muestras experimentales se ha hecho un reemplazo de acuerdo con el porcentaje de incidencia de cada muestra, extrayendo los valores del diseño patrón tanto con agregados naturales como con RCD.

TABLA 09
DISEÑO DE MEZCLAS EXPERIMENTALES A1, A2 Y A3

Materiales	Muestra A0 (Kg/m³)	Muestra 0% A1 (Kg/m³)	Muestra 5% A2 (Kg/m³)	Muestra 10% A3 (Kg/m³)	Muestra 15% (Kg/m³)
Cemento	481.221	481.221	481.221	481.221	
Agua efectiva	151.734	154.579	157.425	160.271	
Agregado fino húmedo	736.519	699.694	662.868	626.042	
Agregado grueso húmedo	958.664	910.731	862.798	814.865	
F. reciclado	0.000	36.387	72.774	109.161	
G. reciclado	0.000	40.101	80.202	120.302	
Relación A/C efectiva	0.315	0.321	0.327	0.333	

TABLA 10
PROPORCIONES DISEÑO DE MUESTRAS A1(5%)

Proporción en peso				
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua	
1	:	1.45	:	13.65 L/bolsa
RCD		0.076	:	0.083
Proporción en volumen aparente				
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua	
1	:	1.44	:	13.65 L/bolsa
RCD		0.078	:	0.095
Proporción en latas por bolsa de cemento				
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua	
1.00 Bolsa	:	2.89	:	13.65 L/bolsa
RCD		0.16	:	0.19

TABLA 11
PROPORCIONES DISEÑO DE MUESTRAS A2(10%)

Proporciones Básicas de Mezclas A2 (19%)				
Proporción en peso				
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua	
1	:	1.38	:	13.90
				L/bolsa
	RCD	0.151	:	0.167
Proporción en volumen aparente				
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua	
1	:	1.37	:	13.90
				L/bolsa
	RCD	0.156	:	0.191
Proporción en latas por bolsa de cemento				
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua	
1.00 Bolsa	:	2.74	:	13.90
				L/bolsa
	RCD	0.31	:	0.38

TABLA 92
PROPORCIONES DISEÑO DE MUESTRAS A3(15%)

Proporción en peso			
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua
1	: 1.3	: 1.69	: 14.15 L/bolsa
RCD	0.227	: 0.25	
Proporción en volumen aparente			
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua
1	: 1.29	: 1.66	: 14.15 L/bolsa
RCD	0.234	: 0.286	
Proporción en latas por bolsa de cemento			
Cemento	A. fino	A. grueso	Agua
1.00 Bolsa	: 2.59	: 3.32	: 14.15 L/bolsa
RCD	0.47	: 0.57	

TABLA 13
RESULTADOS ENSAYO DE ASENTAMIENTO (SLUMP)

Espécimen	Slump (cm)	Slump (Pulg.)
A0	8.50	3 1/3"
A1	8.00	3 1/7"
A2	8.10	3 1/5"
A3	8.40	3 1/3"

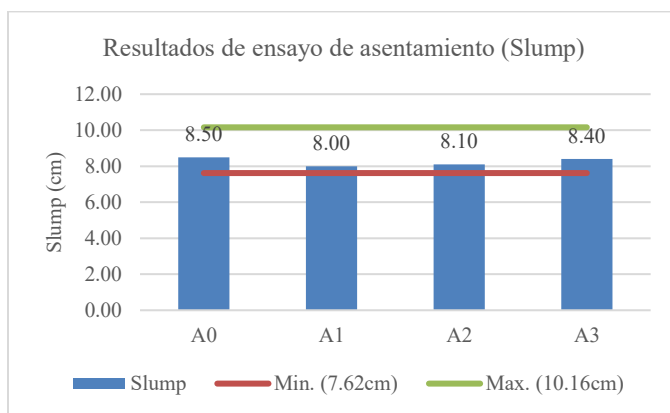


Fig. 5 Resultados ensayo de asentamiento (Slump)

Variación dimensional en adoquines tipo I.

En la tabla 17 se aprecia que el promedio de todas las muestras está por debajo del valor normado, evidenciando una correcta elaboración de adoquines tipo I.

TABLA 14
RESULTADOS ENSAYO DE VARIACIÓN DIMENSIONAL EN ADOQUINES

Muestra	Largo (mm)	%	Ancho (mm)	%	Altura (mm)	%
A0	0.14	0.07	0.16	0.16	0.86	1.44
A1	0.11	0.06	0.13	0.13	0.74	1.24
A2	0.31	0.16	0.11	0.11	0.16	0.26

A3	0.28	0.14	0.4	0.40	0.42	0.70
Prom.	0.21	0.11	0.2	0.20	0.54	0.91
NTP 399.611	1.6	100	1.6	100	3.2	100

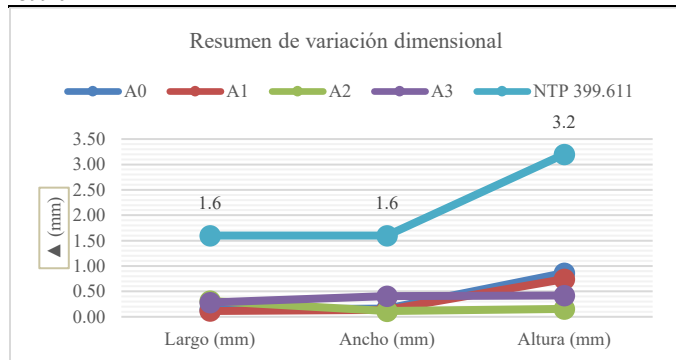


Fig. 6 Resultados ensayos de variación dimensional

Absorción en adoquines tipo I.

TABLA 15
RESULTADOS DE ENSAYO DE ABSORCIÓN EN ADOQUINES

Muestra	Abs. (Kg/m³)	Abs. (%)
A0	104.11	4.47
A1	85.54	3.63
A2	88.28	3.80
A3	121.50	5.41
NTP 399.611		< 6%

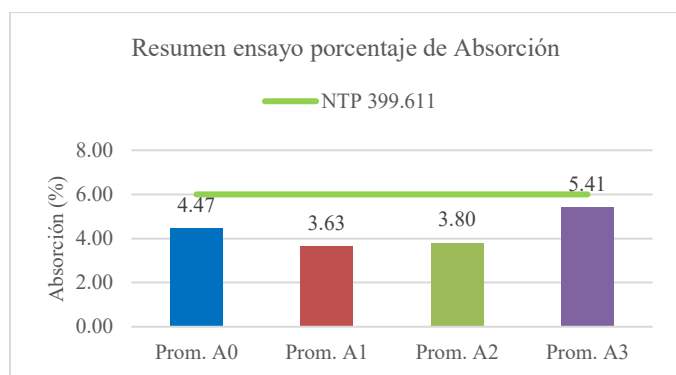


Fig. 7 Resultados de los ensayos de absorción

Resistencia a compresión en adoquines tipo I.

Se aprecia el resumen de los resultados del ensayo de resistencia a compresión en adoquines de concreto, se presenta los resultados de todas las muestras en la que se aprecia la edad (días) y esfuerzo tanto en (Kg/cm²) como en (%) respecto a la resistencia nominal de 320 Kg/cm² y con su respectiva comparación con la muestra patrón A0. Se ha realizado el ensayo a 5 especímenes por muestra a los 7, 14 y 28 días, en la que se evidencia que los promedios de las todas las muestras a los 28 días se encuentran sobre del 100%, sobre el 86% a los 14 días y sobre el 68% a los 7 días, cumpliendo con la normativa

y comportándose de manera muy similar respecto a la muestra patrón tanto a los 7, 14 y 28 días.

TABLA 16
RESUMEN ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN ADOQUINES.

Espécimen	Edad de rotura (días)	Esfuerzo (Kg/cm²)	Esfuerzo (%) NTP 399.611	Esfuerzo (%) muestra patrón A0
Muestra A0	0	0	0.00%	
	7	236.81	74.00%	100.00%
	14	332.83	104.01%	100.00%
	28	409.73	128.04%	100.00%
Muestra A1	0	0	0.00%	
	7	235.15	73.48%	99.30%
	14	325.89	101.84%	97.92%
	28	404.45	126.39%	98.71%
Muestra A2	0	0	0.00%	
	7	230.48	72.03%	97.33%
	14	322.96	100.93%	97.04%
	28	401.85	125.58%	98.08%
Muestra A3	0	0	0.00%	
	7	225.67	70.52%	95.29%
	14	315.31	98.54%	94.74%
	28	397.14	124.11%	96.93%

Nota. Fuente: elaboración propia (2023).

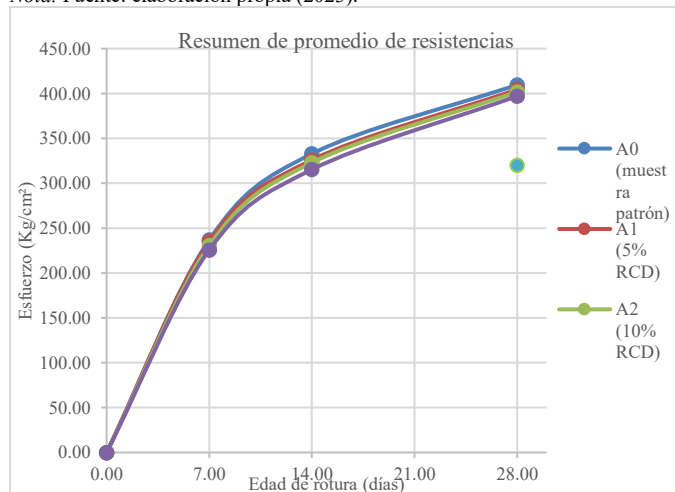


Fig. 8 Resultados de las resistencias a compresión promedio

TABLA 17
CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA, PARA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Nº de espécimen: A0-11				
Punto	Carga (Kg.f)	Δ L (mm)	σ (Kg/cm²)	εu (mm/mm)
1	0	0	0	0.00000

2	5000	0.81	24.9	0.01335
3	10000	1.11	49.8	0.01830
4	15000	1.43	74.7	0.02357
5	20000	1.62	99.6	0.02670
6	25000	1.77	124.5	0.02918
7	30000	1.89	149.39	0.03115
8	35000	2.02	174.29	0.03330
9	40000	2.22	199.19	0.03659
10	45000	2.33	224.09	0.03841
11	50000	2.41	248.99	0.03973
12	55000	2.48	273.89	0.04088
13	60000	2.54	298.79	0.04187
14	65000	2.61	323.69	0.04302
15	70000	2.68	348.59	0.04418
16	75000	2.76	373.49	0.04549
17	80000	2.96	398.39	0.04879
18	83703	3.08	416.83	0.05077

Coefficiente de Variación (CV %)	1.56
f _b (kg/cm²)	403.35
Resistencia min. (%)	128.04%
Conclusión	Cumple
Clasificación (CV)	Excelente

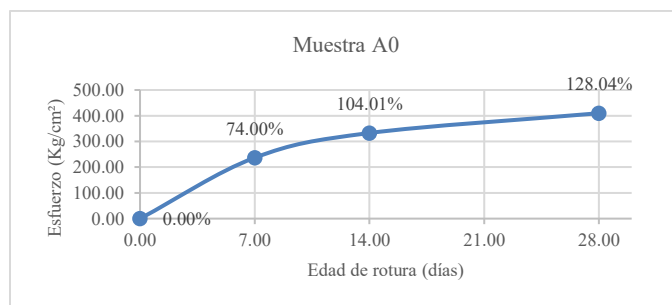


Fig. 10 Curva de esfuerzo-días de rotura A0

TABLA 19

RESISTENCIA A COMPRESIÓN MUESTRAS A1 A LOS 28 DÍAS.

Resistencia a compresión de adoquines A1 a los 28 días						F'c= 320 kg/cm²
Espécimen	Lo (mm)	Ao (mm)	Ho (mm)	Ab (cm²)	Carga Máx (Kg)	f _b (kg/cm²)
A1-11	199.5	100.8	60.3	201.14	82714	411.23
A1-12	199.5	100.5	59.5	200.5	78988	393.96
A1-13	199.7	100.2	60.2	199.98	79781	398.94
A1-14	200.2	100.7	59.8	201.51	80829	401.11
A1-15	200.7	100.2	59.7	201	83818	417
Promedio ($\bar{X}$)						404.45
Desviación Estándar (σ)						9.42
Coeficiente de Variación (CV %)						2.33
f _b (kg/cm²)						395.03
Resistencia min. (%)						126.39%
Conclusión						Cumple
Clasificación (CV)						Muy bueno

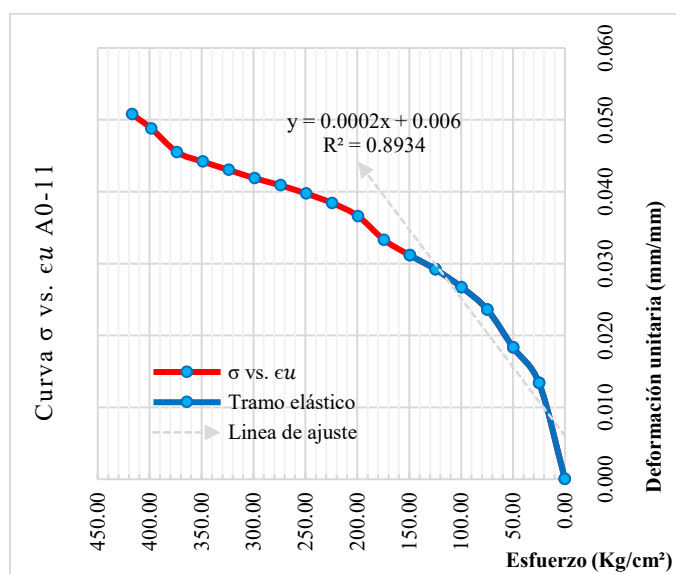


Fig. 09 Curva esfuerzo-deformación unitaria

TABLA 18

RESISTENCIA A COMPRESIÓN MUESTRAS A0 A LOS 28 DÍAS

Resistencia a compresión de adoquines A0 a los 28 días						F'c= 320 kg/cm²
Espécimen	Lo (mm)	Ao (mm)	Ho (mm)	Ab (cm²)	Carga Máx (Kg)	f _b (kg/cm²)
A0-11	200.5	100.2	60.7	200.81	80554	401.14
A0-12	199.7	100	59.7	199.67	81434	407.85
A0-13	199.8	100	59.8	199.82	83703	418.9
A0-14	200.5	100.7	60	201.85	82965	411.03
A0-15	200.3	100.2	59.3	200.67	82220	409.73
Promedio ($\bar{X}$)						409.73
Desviación Estándar (σ)						6.38

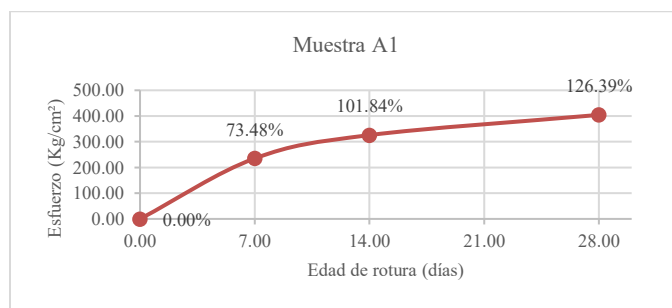


Fig. 11 Curva de esfuerzo-días de rotura A1

TABLA 20

RESISTENCIA A COMPRESIÓN MUESTRAS A2 A LOS 28 DÍAS

Resistencia a compresión de adoquines A2 a los 28 días						F'c= 320 kg/cm ²
Espécimen	Lo (mm)	Ao (mm)	Ho (mm)	Ab (cm ²)	Carga Máx (Kg)	f _b (kg/cm ²)
A2-11	199.7	100.8	60.3	201.29	81668	405.72
A2-12	200.7	101.2	60.8	203.01	81332	400.63
A2-13	200.3	100.5	60.8	201.29	81782	406.28
A2-14	200.7	100.2	60.8	201.01	79881	397.4
A2-15	201.7	100.5	60.7	202.68	80912	399.22
Promedio ($\bar{X}$)						401.85
Desviación Estándar (σ)						3.96
Coeficiente de Variación (CV %)						0.99
f _b (kg/cm ²)						400.87
Resistencia min. (%)						125.58%
Conclusión						Cumple
Clasificación (CV)						Excelente

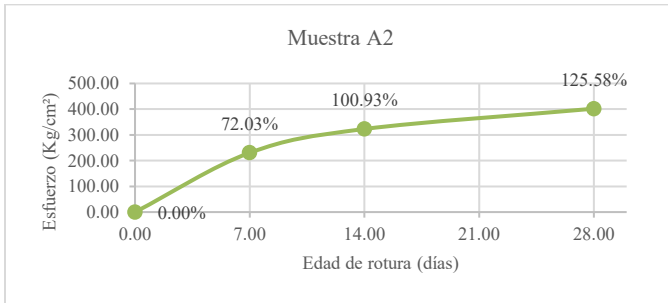


Fig. 12 Curva de esfuerzo-días de rotura A2

TABLA 21

RESISTENCIA A COMPRESIÓN MUESTRAS A3 A LOS 28 DÍAS

Resistencia a compresión de adoquines A3 a los 28 días						F'c= 320 kg/cm ²
Espécimen	Lo (mm)	Ao (mm)	Ho (mm)	Ab (cm ²)	Carga Máx (Kg)	f _b (kg/cm ²)
A3-11	200.5	99.7	61	199.82	77997	390.34
A3-12	199.3	99.8	60.3	198.99	78933	396.67
A3-13	200.8	99.8	60.5	200.5	79874	398.38
A3-14	200.8	100.2	59.8	201.17	79480	395.08
A3-15	199.8	99.2	60.7	198.17	80304	405.23
Promedio ($\bar{X}$)						397.14
Desviación Estándar (σ)						5.42
Coeficiente de Variación (CV %)						1.37
f _b (kg/cm ²)						391.72
Resistencia min. (%)						124.11%
Conclusión						Cumple
Clasificación (CV)						Excelente

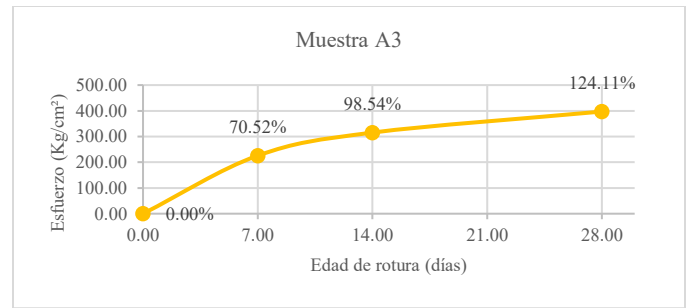


Fig. 13 Curva de esfuerzo-días de rotura A3

Análisis estadístico por Anova y Tukey.

Para el ensayo de resistencia a compresión en adoquines de concreto, se presenta los resultados del análisis estadístico con el 99% de confianza, realizados por el programa Excel para el análisis de varianza Anova y Tukey en el que se plantea como hipótesis estadística nula H_0 y alternativa H_1 como se muestra a continuación.

H_0 : $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4$ (No existe diferencia significativa en la resistencia a compresión del adoquín de concreto con reemplazo de agregados por concreto reciclado de pavimento rígido al 5, 10 y 15%).

H_1 : $\tau_1 \neq \tau_2 \neq \tau_3 \neq \tau_4$ (Existe diferencia significativa en la resistencia a compresión del adoquín de concreto con reemplazo de agregados por concreto reciclado de pavimento rígido al 5, 10 y 15%).

TABLA 22

RESUMEN ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR (ANOVA)
RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Grupos	Cuenta	Suma	Media	Varianza	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Mínimo	Máximo
A0	5	2048.654	409.731	40.742	162.969	2.955	401.100	418.361
A1	5	2022.243	404.449	88.769	355.077	2.955	395.818	413.079
A2	5	2009.262	401.852	15.699	62.796	2.955	393.222	410.483
A3	5	1985.703	397.141	29.412	117.649	2.955	388.510	405.771

Nota. Fuente: obtenido mediante el complemento Excel Real Statistics, 2023.

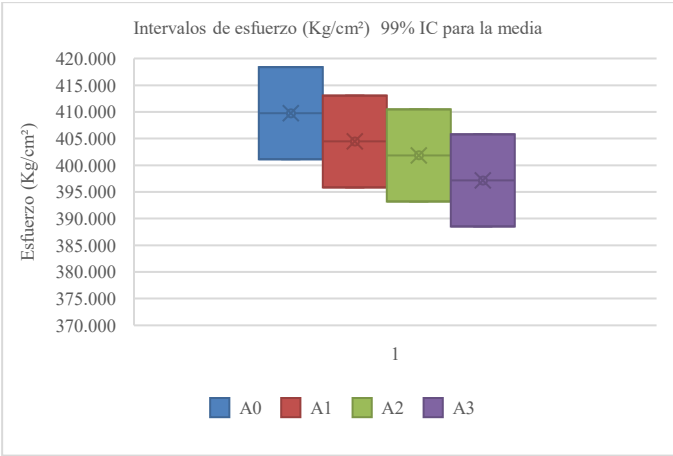


Fig. 14 Intervalos de resistencia a compresión Anova

TABLA 23
 ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR (ANOVA) PARA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados (MS)	F	Probabilidad (P)	Valor crítico para F
Entre grupos	413.541	3	137.847	3.158	0.054	5.292
Dentro de los grupos	698.491	16	43.656			
Total	1112.032	19				

Nota. Fuente: obtenido mediante el complemento Excel Real Statistics, 2023.

De acuerdo a los resultados hallados en la Tabla 26, como la probabilidad $P = 0.054$ es mayor que $\alpha = 0.01$, se acepta la hipótesis nula (H_0); por ende, no hay diferencias significativas entre los 4 tipos según la resistencia a compresión del adoquín de concreto con reemplazo de agregados por concreto reciclado de pavimento rígido al 5, 10 y 15%.

Comparación en parejas (Tukey).

Por último, se realiza las comparaciones múltiples a través de la prueba de Tukey para verificar entre que pares de tratamientos existe las diferencias significativas, o de no ser así, apreciar la dispersión entre ellos; como es en este caso.

TABLA 24
 RESUMEN COMPARACIÓN EN PAREJAS (TUKEY) RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Grupo	Promedio	Suma de cuadrados (SS)	Grados de libertad (df)	q-crit

	A3	A2	A1	A0
	397.141	401.852	404.449	409.731
20	5	5	5	5
698.491	117.649	62.796	355.077	162.969
16				
5.192				

Nota. Fuente: obtenido mediante el complemento Excel Real Statistics, 2023.

TABLA 25
 COMPARACIÓN EN PAREJAS (TUKEY) RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Grupo 1	Grupo 2	Media	Cuad. medio	q-stat	Mínimo	Máximo	Probabilidad	media crítica	Coherencia
A0	A1	5.282	2.955	1.788	-10.059	20.624	0.597	15.342	0.799
A0	A2	7.878	2.955	2.666	-7.463	23.220	0.273	15.342	1.192
A0	A3	12.590	2.955	4.261	-2.751	27.932	0.037	15.342	1.906
A1	A2	2.596	2.955	0.879	-12.745	17.938	0.924	15.342	0.393
A1	A3	7.308	2.955	2.473	-8.034	22.650	0.332	15.342	1.106
A2	A3	4.712	2.955	1.595	-10.630	20.053	0.678	15.342	0.713

Nota. Fuente: obtenido mediante el complemento Excel Real Statistics, 2023.

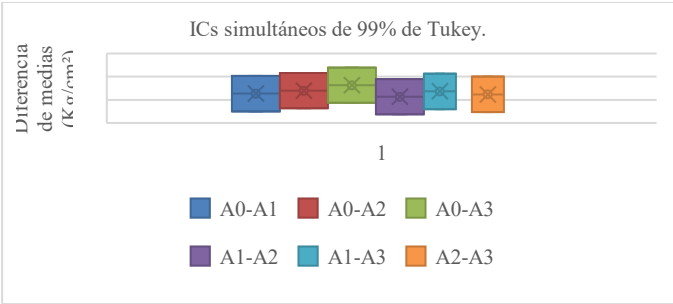


Fig. 15 Diferencia de medias en parejas (Tukey) resistencia a compresión

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Discusión.

La investigación demuestra que los adoquines elaborados con sustitución parcial de agregados por concreto reciclado proveniente de pavimento rígido presentan un comportamiento resistente comparable al de la muestra patrón. Con un nivel de confianza del 99%, el análisis estadístico indica que no existen diferencias significativas en la resistencia a compresión, registrándose reducciones leves en A1 (-1.29%), A2 (-1.92%) y A3 (-3.07%). Todos los tratamientos evaluados superan el requisito mínimo de 320 kg/cm² establecido por la NTP 399.611, alcanzando valores como 409.73 kg/cm² para A0 y 397.14 kg/cm² para A3. Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por Mamani & Tipiana [18], quienes identificaron una ligera disminución de resistencia a medida que aumenta el contenido de agregado reciclado. No obstante, difieren de lo señalado por Vergara [19], quien concluyó que únicamente un reemplazo del 10% cumplía con los parámetros normativos exigidos.

Conclusiones.

El análisis estadístico mediante ANOVA y prueba de Tukey, con un nivel de confianza del 99%, demostró que no existen diferencias significativas entre las mezclas con reemplazo de agregado reciclado y la muestra patrón, evidenciando un comportamiento mecánico comparable. Las dosificaciones con 5%, 10% y 15% de sustitución alcanzaron entre el 96.93% y el 98.71% de la resistencia del concreto convencional, lo que confirma que el reemplazo parcial hasta un 15% no compromete el desempeño estructural de los adoquines.

Los agregados naturales y reciclados cumplieron con los requisitos establecidos en la NTP 400.037 y/o ASTM C33, validando su idoneidad técnica para la fabricación de adoquines tipo I. Se observó una ligera disminución progresiva de la resistencia a compresión conforme aumentó el porcentaje de concreto reciclado, tendencia coherente con el comportamiento esperado de este tipo de material.

Durante la fabricación se mantuvo una consistencia plástica (slump) entre 3" y 4", conforme a la NTP 399.611, asegurando uniformidad en las dimensiones (20×10×6 cm). Asimismo, los valores de absorción oscilaron entre 3.63% y 5.41%, dentro del límite normativo (<6%). A los 7, 14 y 28 días, todas las mezclas superaron la resistencia mínima exigida por la NTP 399.604, con desviaciones inferiores al 3.07% respecto al patrón.

REFERENCIAS

- [1] Akhtar MN, Jameel M, Ibrahim Z, Bunnori NM. Incorporation of recycled aggregates and silica fume in concrete: an environmental savior-a systematic review. *Journal of Materials Research and Technology*. 1 de septiembre de 2022;20:4525-44.
- [2] Berredjem L, Arabi N, Molez L. Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete. *Construction and Building Materials*. 20 de junio de 2020;246:118421.
- [3] Vintimilla C, Etxeberria M. Limiting the maximum fine and coarse recycled aggregates-Type A used in structural concrete. *Construction and Building Materials*. 30 de mayo de 2023;380:131273.
- [4] Quiroga CP. Construcción Latinoamericana. 2022 [citado 7 de agosto de 2023]. Residuos de construcción y demolición. Disponible en: <https://www.construccionlatinoamericana.com/news/residuos-de-construccion-y-demolicion/8020692.article>
- [5] Mohanta NR, Murmu M. Alternative coarse aggregate for sustainable and eco-friendly concrete - A review. *Journal of Building Engineering*. 1 de noviembre de 2022;59:105079.
- [6] Torres L. 70% do entulho no Brasil é descartado incorretamente - Abrecon [Internet]. Abrecon. 2023 [citado 7 de agosto de 2023]. Disponible en: <https://abrecon.org.br/artigos/70-do-entulho-no-brasil-e-descartado-incorretamente>
- [7] Bessa SAL, Gonçalves Mello TA, Lourenço KK. Análise quantitativa e qualitativa dos resíduos de construção e demolição gerados em Belo Horizonte/MG. *urbe, Rev Bras Gest Urbana*. 9 de septiembre de 2019;11:e20180099.
- [8] Guimaraes L. Construcción Latinoamericana. 2022 [citado 7 de agosto de 2023]. Demolición y reciclaje: descarte correcto. Disponible en: <https://www.construccionlatinoamericana.com/news/demolicion-y-reciclaje-descarte-correcto/8018221.article>
- [9] MVCS. Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Gestión y Manejo de Residuos Sólidos de la Construcción y Demolición-DECRETO SUPREMO-N° 002-2022-VIVIENDA [Internet]. Lima: Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento; 2022 abr [citado 7 de agosto de 2023]. Report No.: 002-2022. Disponible en: <http://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/decreto-supremo-que-aprueba-el-reglamento-de-gestion-y-manej-decreto-supremo-n-002-2022-vivienda-2055631-1/>
- [10] Yachachi-Elguera AI, Victoria GJSL, Orosco-Chiclla N, Iannacone J. Impacto de los residuos de construcción y demolición en la zona de reglamentación especial de los pantanos de Villa de Lima, Perú. *Paideia XXI*. 3 de junio de 2022;12(2):263-76.
- [11] Fernández Pérez N. Evaluación del concreto elaborado con residuos de construcción demolición, Chota, 2018 [Internet]. Universidad Nacional Autónoma de Chota; 2021 [citado 7 de agosto de 2023]. Disponible en: <http://repositorio.unach.edu.pe/handle/20.500.14142/158>
- [12] Artavia Aguilar CV, Campos Hernández LR. La investigación en la disciplina de la orientación: procesos de formación desde la percepción estudiantil. *Revista Electrónica Educare*. 2020;24(2):258-73.
- [13] Mendoza SLH, Monroy TIS. Enfoques de la Investigación. *Boletín Científico de las Ciencias Económico Administrativas del ICEA*. 5 de diciembre de 2018;7(13):67-8.
- [14] Álvarez-Risco A. Clasificación de las investigaciones. *Repositorio Institucional - Ulima* [Internet]. 2020 [citado 9 de agosto de 2023]; Disponible en: <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/10818>
- [15] Mucha-Hospinal LF, Chamorro-Mejía R, Oseda-Lazo ME, Alania-Contreras RD. Evaluación de procedimientos empleados para determinar la población y muestra en trabajos de investigación de posgrado. *Desafíos*. 8 de enero de 2021;12(1):50-7.
- [16] Otzen T, Manterola C. Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *International Journal of Morphology*. marzo de 2017;35(1):227-32.
- [17] Mata Solís LD. Métodos y técnicas de investigación cuantitativa [Internet]. *Investigalia*. 2020 [citado 11 de abril de 2024]. Disponible en: <https://investigaliacr.com/investigacion/metodos-y-tecnicas-de-investigacion-cuantitativa/>
- [18] Mamani Quispe JA, Tipiana Contreras LE. Uso del concreto reciclado como agregado y su comportamiento en la resistencia, en adoquines de uso peatonal, Lima 2019 [Internet]. Universidad César Vallejo; 2019 [citado 27 de mayo de 2023]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/46518>
- [19] Vergara Velásquez EM. Utilización del agregado reciclado de la demolición de pavimentos rígidos para la elaboración de adoquines de concreto (tipo I) en la ciudad de Jangas – Huaraz – 2019 [Internet]. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo; 2021 [citado 27 de mayo de 2023]. Disponible en: <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4964>