

Experimental Analysis of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement as Partial Replacement of Coarse Aggregate in Concrete for Rigid Pavements

Jheslyn Mireily Flores Miranda¹; Marcelo Alejandro Mego Racchumi²; Felix Alejandra Velásquez Huayta³

^{1,2}Universidad Privada del Norte, Perú, N00339069@upn.pe, N00320947@upn.pe

³ Universidad Privada del Norte, Perú, felix.velasquez@upn.pe

Abstract– *This study evaluates the feasibility of using reclaimed asphalt pavement (RAP) as a partial replacement of coarse aggregate in concrete for rigid pavements, designed with a characteristic compressive strength of $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Concrete mixtures incorporating RAP at replacement levels of 5%, 10%, and 15% were produced and compared with a conventional control mixture. Prior to mixing, natural aggregates and RAP were characterized through particle size distribution, moisture content, specific gravity, absorption, Los Angeles abrasion, and unit weight tests. The workability of fresh concrete was evaluated using the slump test.*

In the hardened state, compressive strength tests were performed on cylindrical specimens, while flexural strength (modulus of rupture) was determined using concrete beam specimens. The results indicated that the mixture containing 5% RAP exhibited the best mechanical performance, showing an approximate increase of 29% in compressive strength and 4% in flexural strength compared to the control mixture. In contrast, mixtures with 10% and 15% RAP showed a decreasing trend in mechanical properties.

The findings demonstrate that the controlled use of RAP as a partial replacement of coarse aggregate is technically viable and contributes to environmental sustainability by reducing asphalt waste and the demand for natural aggregates. It is concluded that an optimal RAP content of 5% is suitable for application in concrete for rigid pavements, provided that proper material characterization and quality control are ensured.

Keywords– *Rigid pavement, concrete with RAP, partial aggregate replacement, reclaimed asphalt pavement, construction sustainability.*

Análisis experimental del uso de pavimento asfáltico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso en concreto para pavimento rígido

Jheslyn Mireily Flores Miranda¹; Marcelo Alejandro Mego Racchumi²; Félix Alejandra Velázquez Huayta³

^{1,2}Universidad Privada del Norte, Perú, N00339069@upn.pe, N00320947@upn.pe

³ Universidad Privada del Norte, Perú, felix.velasquez@upn.pe

Resumen– La presente investigación evalúa la viabilidad del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) como sustituto parcial del agregado grueso en concreto para pavimento rígido, diseñado para una resistencia característica de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Se elaboraron mezclas de concreto con incorporaciones de RAP del 5%, 10% y 15%, las cuales fueron comparadas con una mezcla patrón convencional. Previamente, los agregados naturales y el RAP fueron caracterizados mediante ensayos de granulometría, contenido de humedad, gravedad específica, absorción, abrasión Los Ángeles y peso unitario. Asimismo, se evaluó la trabajabilidad del concreto fresco mediante el ensayo de asentamiento (slump).

En el estado endurecido, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en probetas cilíndricas y resistencia a la flexión (módulo de rotura) en viguetas de concreto. Los resultados mostraron que la mezcla con 5% de RAP presentó el mejor desempeño mecánico, evidenciando un incremento aproximado del 29% en la resistencia a la compresión y del 4% en la resistencia a la flexión respecto a la mezcla patrón. En contraste, las mezclas con 10% y 15% de RAP mostraron una tendencia a la disminución de dichas propiedades mecánicas.

Los resultados indican que el uso controlado de RAP como sustituto parcial del agregado grueso es técnicamente viable y contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir la disposición de residuos asfálticos y la demanda de agregados naturales. Se concluye que una dosificación óptima del 5% de RAP resulta favorable para su aplicación en concreto para pavimento rígido, siempre que se garantice una adecuada caracterización y control del material reciclado.

Palabras clave– Pavimento rígido, concreto con RAP, reemplazo parcial de agregados, pavimento asfáltico reciclado, sostenibilidad en la construcción.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido de la infraestructura vial ha incrementado de manera significativa la demanda de materiales de construcción, generando impactos ambientales asociados tanto a la explotación intensiva de recursos naturales como a la acumulación de residuos provenientes de la rehabilitación y reconstrucción de carreteras. Frente a este escenario, la ingeniería civil ha orientado sus esfuerzos hacia el desarrollo de alternativas sostenibles que promuevan la reutilización de materiales, con el objetivo de reducir los impactos ambientales sin comprometer el desempeño técnico de las estructuras viales [1].

Uno de los materiales reciclados de mayor aplicación en la ingeniería vial es el pavimento asfáltico reciclado (RAP,

Reclaimed Asphalt Pavement), el cual se obtiene a partir del fresado o demolición de capas asfálticas existentes durante procesos de mantenimiento, rehabilitación o reconstrucción de pavimentos. Su uso en pavimentos flexibles se encuentra ampliamente documentado a nivel internacional, destacándose investigaciones que evidencian beneficios técnicos, económicos y ambientales, tales como la reducción en el consumo de agregados naturales, la disminución de costos y la mitigación de impactos ambientales [2].

Si bien la aplicación del RAP en pavimentos flexibles es una práctica consolidada, en los últimos años se ha incrementado el interés por su uso en concreto para pavimentos rígidos, particularmente como sustituto parcial de los agregados naturales. Diversos estudios experimentales han evaluado esta alternativa, reportando que el desempeño mecánico del concreto con RAP depende principalmente del porcentaje de reemplazo, del tipo de agregado sustituido y del tratamiento previo del material reciclado. Guzmán-Ortiz et al. demostraron que la incorporación controlada de RAP puede mantener e incluso mejorar la resistencia a la compresión y la resistencia a flexión del concreto, siempre que se empleen porcentajes de reemplazo reducidos y un adecuado proceso de recuperación del material [3]. Resultados similares fueron reportados por Guzmán Ortiz, quien observó comportamientos mecánicos comparables entre concretos convencionales y concretos con RAP recuperado y lavado [4].

Otros estudios han abordado el uso de RAP como sustituto del agregado grueso en pavimentos rígidos, evidenciando que reemplazos bajos, del orden del 5%, presentan el mejor desempeño mecánico, mientras que porcentajes mayores generan una reducción significativa de la resistencia del concreto. Investigaciones desarrolladas en proyectos de pavimentos rígidos han mostrado que la incorporación óptima de RAP permite mejorar las propiedades mecánicas del concreto y optimizar el desempeño del concreto para pavimento rígido, contribuyendo a una reducción del consumo de materiales convencionales [5].

A nivel nacional, se han desarrollado investigaciones orientadas al uso de materiales reciclados y alternativos en concreto para pavimentos rígidos, tales como escorias industriales, fibras metálicas, agregados reciclados de pavimentos demolidos y residuos de vidrio. Estos estudios, generalmente realizados para concretos con resistencia característica cercana a $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, han demostrado que

la incorporación controlada de estos materiales puede influir positivamente en la resistencia a la compresión y en el comportamiento mecánico del concreto, además de aportar beneficios ambientales y económicos [6]–[11]. Sin embargo, los trabajos enfocados específicamente en el uso de pavimento asfáltico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso en concreto para pavimento rígido siguen siendo limitados en el contexto peruano, lo que evidencia la necesidad de ampliar el conocimiento técnico sobre esta alternativa.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica del uso de pavimento asfáltico reciclado como sustituto parcial del agregado grueso en concreto para pavimento rígido. Para ello, se elaboraron mezclas de concreto con incorporaciones de RAP del 5%, 10% y 15%, las cuales fueron comparadas con una mezcla patrón convencional. El estudio se centra en la caracterización de los materiales, la evaluación de la trabajabilidad del concreto fresco y el análisis del comportamiento mecánico del concreto endurecido, mediante ensayos de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, con el propósito de aportar evidencia experimental que respalde el uso sostenible del RAP en pavimentos rígidos.

Alcances específicos del estudio:

- Caracterizar las propiedades físicas del agregado grueso, agregado fino y del pavimento asfáltico reciclado mediante ensayos normalizados.
- Evaluar la trabajabilidad del concreto fresco con diferentes porcentajes de incorporación de RAP.
- Determinar la resistencia a la compresión del concreto con reemplazos parciales de RAP del 5%, 10% y 15%.
- Determinar la resistencia a flexión del concreto con reemplazos parciales de RAP del 5%, 10% y 15%.
- Comparar el desempeño mecánico de las mezclas con RAP frente a una mezcla patrón convencional.

II. METODOLOGÍA

A. Enfoque y diseño de investigación

La presente investigación tiene un enfoque experimental y comparativo, con un diseño cuasiexperimental, orientado a evaluar el comportamiento del concreto para pavimento rígido elaborado con pavimento asfáltico reciclado (RAP) como sustituto parcial del agregado grueso. El concreto fue diseñado para una resistencia característica de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, considerando diferentes porcentajes de incorporación de RAP y desarrollándose bajo condiciones controladas de laboratorio, sin asignación aleatoria de las dosificaciones.

El diseño experimental contempló la elaboración de 36 probetas cilíndricas para ensayos de resistencia a la compresión y 12 viguetas de concreto para ensayos de resistencia a la flexión. Las probetas cilíndricas fueron evaluadas a edades de 7, 14 y 28 días, mientras que las

viguetas fueron ensayadas a los 28 días de curado, distribuidas en cuatro dosificaciones correspondientes a contenidos de RAP de 0%, 5%, 10% y 15%.

B. Materiales

Se emplearon como materiales principales cemento Portland, agregado fino natural, agregado grueso natural y pavimento asfáltico reciclado (RAP), obtenido a partir del fresado de pavimentos asfálticos deteriorados. El concreto fue diseñado para una resistencia característica de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

- Agregado fino y agregado grueso, provenientes de la cantera “Juan Sin Miedo”, ubicada en Cajamarca, previamente evaluados en el laboratorio de concreto de la Universidad Privada del Norte (UPN).
- Cemento Portland Tipo I, marca Pacasmayo, adquirido en establecimientos comerciales locales.
- Agua potable, apta para la elaboración de concreto, libre de sustancias perjudiciales.
- Pavimento asfáltico reciclado (RAP), obtenido a partir del fresado de la pavimentación asfáltica existente en la Av. Universitaria, el cual fue procesado y acondicionado para su uso como agregado.

C. Caracterización de los agregados

Los agregados naturales y el RAP fueron caracterizados mediante los siguientes ensayos normalizados:

- **Análisis granulométrico**, según ASTM C136 y NTP 400.012, verificando su cumplimiento con los límites establecidos en ASTM C33 [12].
- **Contenido de humedad**, determinado conforme a ASTM D2216 y NTP 339.127, con el fin de evaluar la condición inicial de los agregados antes del diseño de mezclas [13].
- **Gravedad específica**, evaluada de acuerdo con la norma AASHTO T 84, para determinar las propiedades físicas de los agregados naturales y del RAP [14].
- **Absorción de los agregados**, determinada según la NTP 400.022, mediante la comparación entre la masa seca y la masa saturada superficialmente seca [15].
- **Abrasión Los Ángeles**, realizada conforme a la ASTM C131, con el objetivo de evaluar la resistencia al desgaste de los agregados frente a acciones de impacto y abrasión [16], [17].
- **Peso unitario y contenido de vacíos**, determinados según ASTM C29 y NTP 400.017, parámetros fundamentales para el diseño de mezclas de concreto [18].

Recuperación del agregado fino RAP

La recuperación del agregado fino proveniente del RAP se realizó mediante la Máquina de Desgaste de Los Ángeles (MDA), aplicando criterios modificados del procedimiento

ASTM C131, ajustando tiempos de ensayo y cargas abrasivas con el objetivo de maximizar la recuperación del material. Este procedimiento se basó en metodologías reportadas en estudios previos [3].

D. Diseño de mezclas y elaboración de probetas

Se diseñaron cuatro mezclas de concreto mediante el método **ACI211.1** – *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, considerando una resistencia característica de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ [19].

- Mezcla patrón (0% RAP)
- Mezcla con 5% de RAP
- Mezcla con 10% de RAP
- Mezcla con 15% de RAP

El RAP sustituyó parcialmente al agregado grueso en peso. Las probetas cilíndricas fueron elaboradas y curadas siguiendo los procedimientos establecidos en la normativa correspondiente.

E. Ensayos al concreto fresco

La mezcla elaborada con cada uno de los porcentajes anteriormente (antes de su fraguado) pasó por el ensayo:

- **Asentamiento del concreto (slump)**, evaluado de acuerdo con la NTP 339.035, para verificar la consistencia y trabajabilidad del concreto fresco [20].

F. Ensayos al concreto endurecido

Las probetas cilíndricas fueron ensayadas a los 28 días de curado para determinar:

- **Resistencia a la compresión**, determinada en probetas cilíndricas de concreto a los 7, 14 y 28 días de curado, conforme a la NTP 339.034 y ASTM C39/C39M, con el fin de evaluar la capacidad resistente del concreto elaborado con diferentes porcentajes de RAP [21], [22].
- **Resistencia a la flexión (MR)**, evaluada en viguetas de concreto a los 28 días de curado, de acuerdo con la ASTM C78/C78M y la NTP 339.080, para analizar el comportamiento del concreto frente a esfuerzos de flexión, característicos de los pavimentos rígidos [23], [24].

III. RESULTADOS

A. Propiedades físicas de los agregados

La Tabla 1 presenta las propiedades físicas del agregado fino utilizado en la investigación. El módulo de finura obtenido fue de 2.90, valor que se encuentra dentro del rango recomendado para concretos estructurales, indicando una adecuada gradación del material. Asimismo, el contenido de humedad y la absorción fueron considerados óptimos para el

diseño de mezclas, permitiendo un control adecuado de la relación agua-cemento.

TABLA I
PROPIEDADES DEL AGREGADO FINO.

Agregado Fino	
Peso específico de masa	2.38
Absorción	2.76 %
Contenido de humedad	3.89 %
Módulo de finura	2.90

Nota: Valores utilizados para el diseño de las mezclas de concreto.

Por su parte, la Tabla 2 muestra las propiedades del agregado grueso. El peso específico de masa (2.65) y la baja absorción (0.98%) evidencian la buena calidad del material, adecuado para su uso en concreto para pavimento rígido. Estas propiedades favorecen el desarrollo de resistencias mecánicas consistentes y una adecuada trabajabilidad del concreto.

TABLA II
PROPIEDADES DEL AGREGADO GRUESO.

Agregado Grueso	
Tamaño máximo nominal	3/4
Peso seco compactado	1791 kg/m ³
Peso específico de masa	2.65
Absorción	0.98 %
Contenido de humedad	1.24 %

Nota: Valores utilizados para el diseño de las mezclas de concreto.

B. Resistencia a la compresión del concreto

B.1 Resultados a los 7 días

Las Tablas 3 a 6 presentan los resultados de resistencia a la compresión del concreto a los 7 días de curado. Se observa que la mezcla con 5% de RAP alcanzó un valor promedio de 313.36 kg/cm^2 , superando ampliamente a la mezcla patrón (218.15 kg/cm^2). Las mezclas con 10% y 15% de RAP también presentaron valores superiores al concreto patrón, aunque menores que la dosificación del 5%.

TABLA III
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS
PATRÓN A LOS 7 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F'c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	7	210	34,236	204.497
2	7	210	42,408	233.706
3	7	210	38,725	216.247
PROMEDIO				218.15
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				14.697
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)				6.74%

TABLA IV
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CON
5% DE RAP A LOS 7 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F'c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	7	210	57,841	310.531
2	7	210	58,806	315.711
3	7	210	55,460	313.840
PROMEDIO				313.361
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				2.623
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)				0.84%

TABLA V
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CON
10% DE RAP A LOS 7 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F'c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	7	210	56,156	297.608
2	7	210	54,246	298.945
3	7	210	54,603	293.147
PROMEDIO				296.567
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				3.036
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)				1.02%

TABLA VI
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CON
15% DE RAP A LOS 7 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F'c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	7	210	52,285	285.243
2	7	210	53,243	287.145
3	7	210	51,199	286.396
PROMEDIO				286.261
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				0.958
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)				0.33%

Este comportamiento inicial sugiere que la incorporación de RAP en porcentajes bajos puede contribuir al desarrollo temprano de la resistencia del concreto.

B.2 Resultados a los 14 días

A los 14 días, los resultados mostrados en las Tablas 7 a 10 confirman la tendencia observada a edades tempranas. La mezcla con 5% de RAP alcanzó una resistencia promedio de 329.70 kg/cm², mientras que las mezclas con 10% y 15% de RAP registraron 302.08 kg/cm² y 290.91 kg/cm², respectivamente.

TABLA VII
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS
PATRÓN A LOS 14 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F'c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	14	210	41,169	221.018
2	14	210	45,265	249.452
3	14	210	44,010	239.375
PROMEDIO				236.615
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				14.417
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)				6.09%

TABLA VIII
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CON
5% DE RAP A LOS 14 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F'c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	14	210	61,563	339.269
2	14	210	60,384	332.771
3	14	210	58,291	317.050
PROMEDIO				329.697
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				11.424
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)				3.47%

TABLA IX
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CON
10% DE RAP A LOS 14 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F'c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	14	210	54,396	299.772
2	14	210	55,169	292.377
3	14	210	56,996	314.100
PROMEDIO				302.083
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				11.044
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)				3.66%

TABLA X
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CON
15% DE RAP A LOS 14 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F'c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	14	210	52,358	289.591
2	14	210	53,182	292.723
3	14	210	51,224	290.402
PROMEDIO				290.905
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				1.626

COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)	0.56%
-------------------------------	-------

En comparación, la mezcla patrón presentó una resistencia promedio de 236.62 kg/cm², evidenciando que la incorporación controlada de RAP mejora el desempeño mecánico del concreto durante el proceso de maduración.

B.3 Resultados a los 28 días

Los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días, presentados en las Tablas 11 a 14, muestran el comportamiento final del concreto. La mezcla con 5% de RAP alcanzó la mayor resistencia promedio (338.92 kg/cm²), representando un incremento aproximado del 29% respecto a la mezcla patrón (262.58 kg/cm²).

TABLA XI
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS
PATRÓN A LOS 28 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F ^c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	28	210	48,282	258.358
2	28	210	50,241	265.896
3	28	210	47,365	263.476
PROMEDIO				262.577
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				3.849
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)				1.47%

TABLA XII
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CON
5% DE RAP A LOS 28 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F ^c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	28	210	64,528	342.924
2	28	210	63,174	338.245
3	28	210	61,615	335.594
PROMEDIO				338.921
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				3.711
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)				1.10%

TABLA XIII
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CON
10% DE RAP A LOS 28 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F ^c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	28	210	56,247	305.226
2	28	210	58,599	310.623
3	28	210	55,150	302.225
PROMEDIO				306.025

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)	4.256
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)	1.39%

TABLA XIV
RESULTADOS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS CON
15% DE RAP A LOS 28 DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la compresión del concreto			
	Edad	F ^c de diseño (kg/cm ²)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
1	28	210	54,359	292.441
2	28	210	55,211	295.562
3	28	210	53,729	291.388
PROMEDIO				293.130
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)				2.171
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)				0.74%

De manera general, los valores de desviación estándar y coeficiente de variación obtenidos para las resistencias a la compresión a 7, 14 y 28 días de curado evidencian una adecuada repetibilidad de los ensayos realizados. En todas las edades de curado, las mezclas con incorporación de pavimento asfáltico reciclado (RAP) presentaron coeficientes de variación inferiores al 5%, y en la mayoría de los casos menores al 2%, lo que indica un excelente control experimental y una baja dispersión de los resultados.

En comparación, la mezcla patrón mostró coeficientes de variación ligeramente superiores, especialmente a edades tempranas, aunque dentro de los límites aceptables para ensayos de concreto. Estos resultados confirman la confiabilidad de los valores de resistencia obtenidos y respaldan el análisis comparativo del comportamiento mecánico del concreto con diferentes contenidos de RAP.

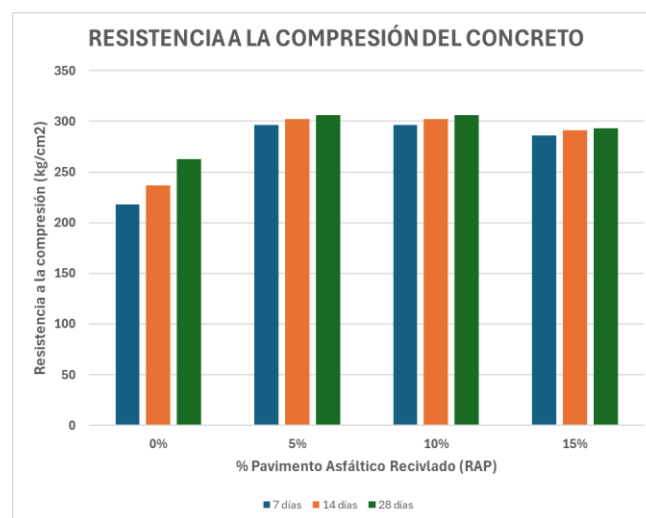


Fig. 1 Evolución de la resistencia a la compresión promedio del concreto a 7, 14 y 28 días para diferentes contenidos de RAP.

Como se observa en la Fig. 1, la resistencia a la compresión del concreto aumenta con la edad de curado para todas las dosificaciones evaluadas. La mezcla con 5% de RAP presentó los mayores valores de resistencia en las tres edades analizadas (7, 14 y 28 días), evidenciando un desempeño superior respecto a la mezcla patrón.

Por su parte, las mezclas con 10% y 15% de RAP mostraron un incremento progresivo de la resistencia con el tiempo, aunque con valores inferiores a los obtenidos con 5% de RAP, especialmente a los 28 días. Esta tendencia confirma que la incorporación de RAP en porcentajes moderados favorece el desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto, mientras que contenidos mayores pueden afectar su desempeño mecánico final.

C. Resistencia a la flexión (módulo de rotura)

La Tabla 15 y la Fig. 2 presentan los resultados del ensayo de resistencia a la flexión (módulo de rotura) del concreto a los 28 días de curado. La mezcla con 5% de RAP alcanzó el mayor valor promedio de resistencia a la flexión (32.72 kg/cm²), superando ligeramente al concreto patrón (31.46 kg/cm²). En contraste, las dosificaciones con 10% y 15% de RAP registraron valores de 30.97 kg/cm² y 29.69 kg/cm², respectivamente, los cuales no superaron la resistencia del concreto convencional.

TABLA XV
RESULTADOS RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LAS VIGUETAS A LOS 28
DÍAS DE CURADO

Muestra	Resistencia a la flexión del concreto Fb (kg/cm²)			
	Patrón	5% RAP	10% RAP	15% RAP
1	29.040	27.912	27.45	27
2	30.125	34.438	30.4	28.266
3	35.200	35.798	35.05	33.799
PROMEDIO (KG/CM2)	31.455	32.716	30.967	29.688
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD)	3.288	4.216	3.832	3.616
COEFICIENTE DE VARIACIÓN (CV)	10.45%	12.89%	12.37%	12.18%

Los valores de desviación estándar y coeficiente de variación, comprendidos entre 10.45% y 12.89%, evidencian una dispersión moderada de los resultados, característica habitual de los ensayos de flexión en concreto, debido a la sensibilidad del ensayo a la heterogeneidad del material y a la presencia de microdefectos internos en las viguetas. No obstante, dichos valores se encuentran dentro de rangos aceptables, lo que respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos.

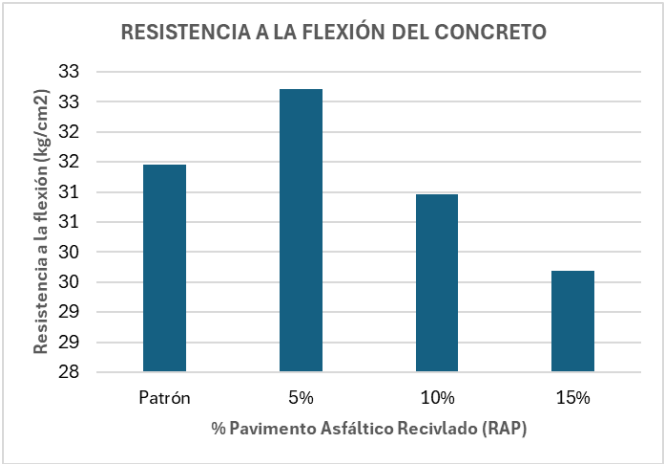


Fig. 2 Comparación de la resistencia a la flexión (módulo de rotura) del concreto a los 28 días para diferentes contenidos de RAP.

En conjunto, los resultados confirman que la incorporación de RAP en un 5% como sustituto parcial del agregado grueso puede mejorar ligeramente el comportamiento del concreto frente a esfuerzos de flexión, mientras que porcentajes mayores tienden a afectar negativamente esta propiedad mecánica.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la presente investigación se realizaron ensayos experimentales con el objetivo de evaluar la influencia del pavimento asfáltico reciclado (RAP) como sustituto parcial del agregado grueso en mezclas de concreto para pavimento rígido, considerando porcentajes de reemplazo de 0%, 5%, 10% y 15%. Los resultados obtenidos evidencian que el incremento del contenido de RAP genera variaciones en el comportamiento mecánico del concreto, las cuales dependen principalmente del porcentaje de sustitución empleado.

En relación con la resistencia a la compresión, los resultados promedio a los 28 días de curado fueron de 262.58 kg/cm², 338.92 kg/cm², 306.03 kg/cm² y 293.13 kg/cm² para las dosificaciones con 0%, 5%, 10% y 15% de RAP, respectivamente. Estos valores demuestran que la incorporación de RAP en la mezcla de concreto puede contribuir a mejorar la resistencia a los esfuerzos de compresión cuando se emplea en porcentajes bajos. En particular, la dosificación con 5% de RAP presentó el mejor desempeño mecánico, superando significativamente a la mezcla patrón.

Este comportamiento concuerda con lo reportado en la investigación “Diseño de un pavimento rígido con pavimento asfáltico reciclado como sustituto del agregado grueso en la Ruta del Cacao” [5], donde se identificó que el porcentaje óptimo de reemplazo corresponde al 5% de RAP, mientras que dosificaciones mayores generan una disminución progresiva de la resistencia a la compresión. En ese sentido, los resultados obtenidos en el presente estudio confirman que un

mayor contenido de RAP no implica necesariamente un mejor comportamiento estructural del concreto, sino que existe un rango óptimo de incorporación.

Por otro lado, en cuanto a la resistencia a la flexión (módulo de rotura), las viguetas ensayadas a los 28 días presentaron valores promedio de 31.46 kg/cm², 32.72 kg/cm², 30.97 kg/cm² y 29.69 kg/cm² para las dosificaciones con 0%, 5%, 10% y 15% de RAP, respectivamente. Se observa un ligero incremento de la resistencia a la flexión en la mezcla con 5% de RAP respecto al concreto convencional; sin embargo, al aumentar el porcentaje de reemplazo a 10% y 15%, se produce una disminución del módulo de rotura, evidenciando que el RAP no siempre contribuye a mejorar el comportamiento del concreto frente a esfuerzos de flexión.

Al comparar estos resultados con el estudio desarrollado por Guzmán et al. (2021) [3], se observa que el comportamiento mecánico del concreto con RAP depende en gran medida de la condición del material reciclado, destacándose mejores resultados cuando el RAP es recuperado y lavado, tanto en resistencia a la compresión como a la tracción. En el presente estudio, el método de recuperación y las propiedades físicas del RAP empleado podrían haber influido en la disminución de la resistencia a la flexión para porcentajes elevados de reemplazo.

Asimismo, los resultados difieren de los reportados por Melena y Peñafiel (2023) [5], quienes obtuvieron incrementos significativos en la resistencia a la flexión al aumentar el porcentaje de RAP. Esta diferencia puede atribuirse a variaciones en el origen del material reciclado, al método de procesamiento del RAP y a las características propias del diseño de mezcla, lo que refuerza la importancia de considerar el tratamiento del material reciclado y su compatibilidad con la matriz cementicia.

Finalmente, el análisis comparativo de las propiedades mecánicas evidencia que las probetas y viguetas con 5% de RAP alcanzaron los mejores resultados tanto en compresión (338.92 kg/cm²) como en flexión (32.72 kg/cm²), lo que representa un incremento aproximado del 29% en resistencia a la compresión y del 4% en resistencia a la flexión respecto a la mezcla patrón. En contraste, las mezclas con 10% y 15% de RAP mostraron incrementos moderados en la resistencia a la compresión, pero reducciones en la resistencia a la flexión, comportamiento similar al reportado por Guzmán (2020) [4], quien observó disminuciones progresivas del módulo de rotura al incrementar el contenido de RAP.

Además, con el fin de fortalecer el rigor del estudio, el comportamiento mecánico del concreto se encuentra directamente influenciado por las propiedades del RAP, cuya naturaleza heterogénea y contenido de ligante residual condicionan la interacción en la matriz cementicia. Observado mediante el mejor desempeño del 5% de RAP, pudiendo atribuirse a efectos de mejora en la compactación interna y a un efecto de relleno que optimiza la distribución granulométrica. Por el contrario, contenidos más altos (10% y 15%) tienden a generar reducción en la adherencia entre el agregado reciclado y la pasta de cemento, radicando en la

presencia de una película asfáltica que actúa como interfaz débil, afectando principalmente a la resistencia a la flexión

Aparte que, desde un punto de vista ambiental, se determinó como estimación preliminar que la incorporación de 5% de RAP permite la reutilización de aproximadamente 48 kg de material reciclado por cada m³ de concreto, lo equivalente a una reducción aproximadamente de 0.24 kg de CO₂ asociada a la disminución la extracción de agregados naturales. Y a escalas de proyectos, para un tramo típico de pavimento rígido de 1 km, esto representaría una valorización estimada de 33.6 toneladas de RAP y una reducción estimada de 168 kg de CO₂. Evidenciándose el potencial ambiental del uso de RAP, aunque es recomendable la complementación del análisis mediante estudios de ciclo de vida.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten afirmar que la incorporación controlada de RAP, particularmente en porcentajes bajos, constituye una alternativa técnicamente viable para pavimentos rígidos; no obstante, el desempeño mecánico del concreto depende de factores como el porcentaje de reemplazo, el método de recuperación del agregado reciclado y sus propiedades físicas.

V. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión, se concluye lo siguiente:

- La sustitución parcial del agregado grueso por pavimento asfáltico reciclado (RAP) es técnicamente viable para la elaboración de concreto destinado a pavimentos rígidos con una resistencia de diseño de $f'c = 210$ kg/cm², siempre que se empleen porcentajes de reemplazo controlados.
- La dosificación con 5% de RAP presentó el mejor comportamiento mecánico, alcanzando los mayores valores de resistencia a la compresión en comparación con la mezcla patrón y con las dosificaciones de 10% y 15% de RAP, lo que evidencia que un mayor contenido de material reciclado no implica necesariamente una mejora del desempeño estructural del concreto.
- En cuanto a la resistencia a la flexión (módulo de rotura), la incorporación de 5% de RAP permitió obtener un incremento aproximado del 4% respecto a la vigueta patrón, mostrando un comportamiento coherente con los resultados observados en compresión y superando a las dosificaciones con mayores porcentajes de reemplazo.
- Las mezclas con 10% y 15% de RAP presentaron incrementos moderados en la resistencia a la compresión; sin embargo, evidenciaron una reducción en la resistencia a la flexión, lo que sugiere que contenidos elevados de RAP pueden afectar negativamente la adherencia entre la matriz cementicia y el agregado reciclado.

- Desde un enfoque ambiental, la incorporación de RAP en mezclas de concreto para pavimentos rígidos contribuye a la valorización de residuos provenientes de la rehabilitación vial, a la reducción de la extracción de agregados naturales y a la disminución del volumen de escombros generados, promoviendo prácticas más sostenibles en la construcción de infraestructura vial.

VI. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda evaluar el comportamiento del concreto con RAP a edades mayores de curado e incorporar ensayos de durabilidad que permitan analizar su desempeño a largo plazo en pavimentos rígidos. Asimismo, resulta fundamental asegurar una adecuada calidad, homogeneidad y tratamiento previo del RAP, considerando la influencia de su origen y procesamiento en las propiedades mecánicas del concreto. Finalmente, se sugiere analizar distintos métodos de recuperación del RAP y promover su aplicación en proyectos piloto de pavimentos rígidos de bajo y mediano tránsito, como una alternativa técnica, ambiental y económicamente viable.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Privada del Norte (UPN), sede Cajamarca, por el apoyo brindado a través del Laboratorio de Concreto, así como por las facilidades otorgadas para la ejecución de los ensayos experimentales desarrollados en la presente investigación.

Asimismo, se agradece al personal técnico del laboratorio por su apoyo durante la preparación de las mezclas, la elaboración de las probetas y la realización de los ensayos de laboratorio. De igual manera, se reconoce el respaldo académico brindado por los docentes de la Facultad de Ingeniería Civil, cuyas orientaciones contribuyeron al adecuado desarrollo del estudio.

Finalmente, se agradece a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, colaboraron con la ejecución de la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] M. Monroy Linarez, J. León Gallego y M. Ramos Cárdenas, *Monografía del uso de RAP para la rehabilitación de vías urbanas*, Colombia, 2020.
- [2] F. Xiao et al., "A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement," *Construction and Building Materials*, vol. 180, pp. 579–604, 2018.
- [3] D. V. Guzmán-Ortiz et al., "Uso de agregado de pavimento asfáltico reciclado para un pavimento rígido," *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, vol. XXII, no. 1, 2021.
- [4] D. Guzmán Ortiz, *Concreto hidráulico utilizando agregados reciclados de pavimento asfáltico para un pavimento rígido*, Tesis de maestría, UAQ, 2020.
- [5] J. A. Melena Villalva y T. J. Peñafiel Goyón, *Diseño de un pavimento rígido con RAP como sustituto del agregado grueso*, ESPOL, 2023.
- [6] A. Quispe Benavente, *Mejoramiento del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con escorias de cobre y fibras de aluminio*, Perú, 2024.

- [7] R. Castillo y J. Montenegro, *Caracterización del asfalto reciclado en concreto hidráulico*, Perú, 2023.
- [8] N. Bustamante, *Diseño de carpeta asfáltica utilizando RAP*, Perú, 2018.
- [9] A. Asencio Sangay, *Agregados reciclados y resistencia a la compresión del concreto*, Perú, 2014.
- [10] I. Bobadilla, *Concreto con agregados reciclados de pavimentos rígidos*, Cajamarca, 2019.
- [11] M. A. Centurión Vargas, *Resistencia del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con agregados reciclados*, Cajamarca, 2022.
- [12] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 400.012: *Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global*, Lima, Perú, 2013.
- [13] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 339.127: *Método de ensayo para determinar el contenido de humedad*, Lima, Perú, 2019.
- [14] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), AASHTO T 84: *Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*, Washington, D.C., USA.
- [15] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), *Manual de Ensayo de Materiales – Norma 400.022: Absorción de los agregados*, Lima, Perú, 2016.
- [16] ASTM International, ASTM C131/C131M: *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*, West Conshohocken, PA, USA.
- [17] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 400.019: *Método de ensayo para determinar la abrasión Los Ángeles de los agregados*, Lima, Perú, 2019.
- [18] ASTM International, ASTM C29/C29M: *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*, West Conshohocken, PA, USA.
- [19] ACI Committee 211, ACI 211.1: *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- [20] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 339.035: *Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto*, Lima, Perú, 2009.
- [21] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 339.034: *Método de determinación de la resistencia a la compresión del concreto*, Lima, Perú, 2008.
- [22] ASTM International, ASTM C39/C39M: *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, West Conshohocken, PA, USA.
- [23] ASTM International, ASTM C78/C78M: *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*, West Conshohocken, PA, USA.
- [24] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), NTP 339.080: *Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto*, Lima, Perú.