



ADICIÓN DE CAUCHO MOLIDO Y PIEDRA CALIZA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS PARA UN CONCRETO SOSTENIBLE

ADDITION OF GROUND RUBBER AS A CONSTRUCTION MATERIAL FOR THE IMPROVEMENT OF THE PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES FOR A SUSTAINABLE CONCRETE

Roselhyn, Lurita Suárez¹; Leopoldo, Choque Flores²

Recibido 25/07/2024; Aprobado: 30/11/2024

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica261.7>

RESUMEN

Ante el aumento desmedido de construcciones de concreto que se presenta actualmente, la presencia de problemas de agrietamientos y colapsos han afectado directamente su durabilidad, estabilidad y longevidad siendo una preocupación constante para la ciudadanía y el sector ingenieril, por lo que, en el presente documento científico se hace manifiesto el objetivo de evaluar el concreto aplicando agregados de piedra caliza de la cantera Trapiche junto a la adición de caucho molido con el propósito de mejorar las propiedades físico-mecánicas base que este posee. Para lo cual, se plantea como metodología investigativa de carácter y diseño experimental mediante un enfoque cuantitativo, evaluando especímenes de concreto elaborados bajo la norma del Instituto Americano del Concreto (A.C.I.) 211 para cumplir el objetivo de mejorar las propiedades físico-mecánicas del concreto sostenible. Los resultados obtenidos en el estudio mostraron que, en los ensayos de resistencia a los 28 días en efectos de compresión simple el concreto grupo 0 (G0) frente al grupo 1 (G1) de 2,7% de caucho molido (CM) obtuvo una resistencia de 22,40 MPa, mientras que en las pruebas de flexión alcanzó un valor flector de 5,01 MPa con la adición de 2,7% de caucho molido. No obstante, para los ensayos físicos de asentamiento del concreto, se evidenció que CM mejora todas las muestras experimentales desde un 6,67%, siendo el valor mayor de mejoría propuesto por el grupo 2 (G2) y el 3 (G3) con 4 ¼” pulgadas, con un patrón de 3 ¾”.

Palabras clave: concreto sostenible; durabilidad de materiales; caucho reciclado; agregado de piedra caliza

¹Roselhyn, Lurita Suárez. Ingeniero civil de la Universidad César Vallejo. Lima. Perú. Correo: rluritas@ucvvirtual.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7273-0107>

²Leopoldo, Choque Flores. Doctor en ingeniería civil, docente investigador en la Universidad César Vallejo. Lima. Perú. Correo: lchoquef@ucv.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0914-7159>

ABSTRACT

Given the excessive increase in concrete constructions that is currently occurring, the presence of cracking and collapse problems has directly affected its durability, stability and longevity, being a constant concern for citizens and the engineering sector, therefore, in this paper, the objective of evaluating concrete by applying limestone aggregates from the Trapiche quarry along with the addition of ground rubber with the purpose of improving the base physical-mechanical properties that it has. For which, it is proposed as an investigative methodology of experimental nature and design through a quantitative approach, evaluating concrete specimens prepared under the standard of the American Concrete Institute (A.C.I.) 211 to meet the objective of improving the physical-mechanical properties of sustainable concrete. The results obtained in the study showed that, in the resistance tests at 28 days in simple compression effects, the concrete group 0 (G0) compared to group 1 (G1) of 2,7% ground rubber (CM) obtained a resistance of 22,40 MPa, while in the bending tests it reached a bending value of 5.01 MPa with the addition of 2,7% of ground rubber. However, for the physical concrete settlement tests, it was evident that CM improves all the experimental samples by 6,67%, with the highest improvement value proposed by group 2 (G2) and 3 (G3) with 4 ¼" inches, with a 3 ¾" pattern.

Keywords: *sustainable concrete; durability of materials; recycled rubber; limestone aggregate*

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de un complemento a la hora de hacer un compuesto para materiales destinados a la construcción resulta una alternativa viable y sustentable, ya que, la aparición de fisuras y grietas en las estructuras de concreto, aun sin la presencia de fatiga por cargas, es un problema alarmante que pone en riesgo la integridad y seguridad de las edificaciones [1]. En consecuencia, evaluaciones realizadas han revelado que estas fallas estructurales se originan desde la misma mezcla de concreto utilizada, la cual carece de la resistencia y durabilidad adecuadas. Esta deficiencia en la calidad del material conduce a un debilitamiento progresivo de la estructura, disminuyendo significativamente su desempeño y acortando su vida útil, lo que eventualmente puede desencadenar un colapso prematuro, situación que representa un desafío crítico en la construcción, ya que pone en riesgo la seguridad de los ocupantes y requiere medidas urgentes para abordar las causas subyacentes y garantizar la integridad de las edificaciones de concreto.

En este contexto, el agrietamiento y la durabilidad reducida del concreto son problemas graves que afectan a numerosas estructuras en Ecuador, muchas viviendas presentan deterioros en elementos estructurales clave como vigas, columnas y muros, poniendo en riesgo a numerosos hogares ecuatorianos, contemplando como causas principales de estos problemas a la falta de resistencia del concreto y la presencia de factores que aceleran el deterioro de la estructura, situación ha llevado al debilitamiento progresivo de las edificaciones, hasta el punto del colapso en algunos casos, dejando a muchas familias sin

hogar y expuestas a peligros [2]. En Perú, la problemática de los agrietamientos y la durabilidad reducida del concreto en estructuras es un reto considerable debido a las condiciones ambientales y climáticas del país, así mismo, en zonas costeras la alta salinidad del ambiente marino y la presencia de cloruros pueden causar la corrosión acelerada del acero de refuerzo lo que conduce a la formación de grietas y el desprendimiento del recubrimiento de concreto, por otro lado, los ciclos de humedecimiento y secado, junto con la acción abrasiva del viento marino cargado de sales, contribuyen al deterioro superficial del concreto y la formación de eflorescencias, estas condiciones adversas, sumadas a prácticas deficientes de construcción, falta de mantenimiento adecuado y el uso de materiales de baja calidad, han llevado a numerosos casos de estructuras de concreto deterioradas prematuramente, lo que representa un riesgo para la seguridad y un costo económico sustancial para el país [3].

La situación en Trapiche, zona norte de Carabayllo distrito de Lima Perú es preocupante, las estructuras han sido testigos de la misma problemática de falta de resistencia del concreto debilitando paulatinamente las viviendas de la zona, dando como consecuencia, la aparición constante de fisuras y grietas en los inmuebles alertando a los residentes quienes temen de futuros y/o no tan lejanos colapsos de las estructuras agrietadas. Por lo que, se realizó este estudio a fin de buscar alternativas sostenibles para mejorar la calidad de las mezclas de concreto adicionando caucho molido y caliza.

2. DESARROLLO

Un estudio revelador sobre el estado de las edificaciones en zonas descentralizadas mostró resultados preocupantes, se determinó un patrón generalizado de degradación con una proporción significativa de fisuras y agrietamientos exhibiendo daños estructurales severos acompañado de ataques corrosivos acelerando aún más el proceso de deterioro y comprometiendo la seguridad de los ocupantes [4]. No obstante, es de saber que se tienen diversos procesos para elaborar el concreto, con contenido de aire, sumergidas, diferentes espesores y variación de temperatura para su endurecimiento, esto con la finalidad de reducir la corrosión y problemas desencadenantes.

Así mismo, para la producción de concreto estructural también se considera el uso de aditivos enfocados a la mezcla netamente, entre los más comunes están los plastificantes y acelerantes, como también la inserción de una gama de fibras sintéticas (FS) y de origen natural (FN). Donde al emplear estos elementos dentro de las mezclas de concreto contribuya positivamente en el comportamiento físico y resistente de las estructuras, siendo que las fibras brinden una mejor adherencia de los materiales aglomerados con el cemento portland (CP) durante y

después del fraguado buscando como referencia una mejor resistencia mecánica y amplitud en lo que a durabilidad respecta [5].

En el Perú, el crecimiento desmedido poblacional sumado al aumento de adquisición de vehículos de propósito particular dio como consecuencia al incremento de material de desecho y materiales contaminantes perjudiciales con el ambiente, en tanto la aparición de neumáticos desechados por las calles generó un problema al no tener un plan de reciclaje, lo que generó un índice de subida del 8,8% anual de vehículos abandonados y/o confiscados. Por tanto, se presentó en la ciudad de Trujillo la intención de evaluar el concreto estructural con la implementación del material de caucho extraído de neumático como técnica para la producción de un concreto optimizado y resistente ante fisuramientos [6]. Debido a que las fibras de caucho (FC) se afianza efectivamente con los demás materiales del concreto además de que junto al superplastificante (SP) permite una mayor trabajabilidad y fluencia en el vaciado [6].

En consecuencia, se presentó en otra investigación la experimentación del concreto con fibras de caucho reutilizado de neumáticos (CRN) arrojados y clinker de aceite de palma (CAP) en diferentes especímenes, siendo para el primer caso 26,70 MPa con 3% de CRN, mientras que para las muestras de CAP con un valor óptimo de 33,54 MPa, finalmente consiguieron una mejora de 34,81 MPa equivalente al 7,6% con las dosificaciones combinadas de 2,5% CRN y 12,5% CAP respectivamente [3]. Ahora bien, el tema principal de este trabajo que aquí se presenta fue concebir métodos novedosos para fabricar concreto de resistencia standard o superior, que sea económico y sostenible, lo cual se logró al incorporar caucho triturado de llantas desechadas y agregado de piedra caliza de la cantera Trapiche, de la zona norte de Carabayllo distrito de Lima Perú Esta mezcla pretende solucionar dificultades comunes del concreto, como la grieta por esfuerzo y la corrosión, las cuales disminuyen la vida útil del concreto. Además, la utilización de caucho reusable no sólo incrementa la elasticidad del cemento, sino que representa una solución al problema ambiental en el momento de utilizar los residuos de neumáticos para mejorar la resistencia del concreto y reducir la cantidad de ellos en los vertederos.

En este contexto, se desarrolló como el objetivo principal del estudio evaluar el impacto de la adición de caucho molido en el concreto y agregado de piedra caliza de la cantera Trapiche como materiales constructivos, con el propósito de mejorar sus propiedades físico-mecánicas. Esta innovadora aproximación busca aprovechar los recursos locales, combinándolos con partículas de caucho reciclado para aumentar la resistencia compresiva y flectora del concreto.

Para lograr este objetivo, se realizaron diversos ensayos mecánicos y físicos siguiendo las normas establecidas:

- ASTM C 39 [7] para pruebas de compresión
- ASTM C 78 [8] para flexión
- ASTM C 143 [9] para determinar el asentamiento del concreto
- ASTM C 33 [10] destinado a la especificación de agregados.

3. METODOLOGÍA

En referencia al procedimiento de la presente investigación aplicada, se ideó una resolución apoyada en la hipótesis de que la mezcla de cemento molido como material para la construcción de edificaciones con propiedades físicas y mecánicas, teniendo como eje la sustentabilidad. Este punto de vista mezcla componentes tanto de la técnica, considerando no solo la capacidad mecánica del concreto modificado, para ser usado en proyectos de construcción sustentable. El estudio de los objetivos se centró en comprobar si la adición de caucho molido y piedra caliza aumenta la capacidad del concreto en comparación a la misma cantidad de cemento tradicional. Para llevar a cabo este análisis, se requirió un estudio comparado entre el concreto normal y el concreto modificado con caucho, el objetivo es develar la fiabilidad, duración y viabilidad económica de uno y otro [11].

Así mismo, el presente se clasificó como nivel explicativo [12]. Este punto de vista posibilita investigar y precisar la utilidad del molido de caucho en el concreto a través de pruebas de laboratorio que validan las teorías respecto a su utilidad. De esta manera, se validó la viabilidad técnica de esta novedosa concepción en el área de la construcción. En referencia al diseño de la metodología, se utiliza un punto de vista cuasiexperimental, ya que se modificó la variable independiente, con el fin de delimitar su efecto sobre la variable dependiente: las características físico-mecánicas del concreto. Este modelo ofrece una manera de determinar con exactitud y control la capacidad del concreto modificado en comparación con el concreto común, y de esta manera, genera información fundamental acerca de las posibilidades de este material como material para la construcción sostenible

En base a la definición del nivel investigativo acerca del estudio de causa y efecto entre variables sin la manipulación de ellas, se fundamenta en la comprobación, observación y pruebas de variables para calcular la fuerza y dirección de las relaciones existentes [13]. Por lo cual, se establecieron relaciones causales entre las variables examinadas con el propósito principal de investigar cómo la incorporación de caucho molido afecta las propiedades físico-

mecánicas del concreto, particularmente cuando se combina con agregados de Trapiche. Esta investigación buscó no solo identificar correlaciones, sino también explicar los mecanismos subyacentes que influyen en el comportamiento del concreto modificado, proporcionando así una comprensión más profunda de las interacciones entre los materiales y sus efectos en el producto final.

Se constató como cantidad general de 72 unidades de concreto, entre las que estarían los especímenes estándar y los modificados con caucho molido (CM) con dimensionamiento de 10x20 cm para los testigos y de 15x15x50 cm para las vigas, de este modo se destinaron 3 muestras para cada patrón y dosificación de CM repitiéndose este proceso para las edades de curado a evaluarse, todo este proceso fue siguiendo las normas peruanas de concreto con el apartado E.060 del Reglamento Nacional Edificaciones (RNE) [14].

Respecto al desarrollo del estudio, se procedió a seguir una serie de procesos continuos para conseguir los resultados de los ensayos con CM:

- Indagación y recopilación de información: se procedió a realizar una investigación exhaustiva y detallada sobre los problemas del concreto convencional, y concreto con adiciones similares del presente estudio en donde se evalúa las propiedades de interés, por otro lado, se buscaron empresas que brinden y/o recolecten el caucho.
- Evaluación y caracterización de los elementos de estudio: se llevó a cabo la caracterización de los agregados de la cantera Trapiche según la norma ASTM C33 [10], analizando las muestras ante pruebas de contenido de humedad, granulometría, densidad específica y absorción, mientras en el caso del caucho se realizó el pesaje con propósito de presentar la cantidad exacta de material para cada experimental de CM.
- Diseño de concreto según A.C.I.: se cuantificaron las cantidades de materiales se emplearían para la elaboración del concreto estructural equivalente a 20,69 MPa [15], entre los que se encontrarían los agregados de caliza de la cantera Trapiche, cemento, agua y el CM. De este modo, se tuvo como base las dosificaciones para el concreto que sería patrón para luego variar porcentualmente el agregado e implementar el caucho sin modificar considerablemente el peso de la mezcla en el cálculo.
- Fase de experimentación: En cuarta instancia, se procedió a realizar en el laboratorio (<https://jjgeotecniasac.com/laboratorio-de-concreto-en-lima/>) los ensayos propuestos de las muestras con y sin contenido del caucho molido (CM) para las pruebas de compresión (cilindros) y de flexión (vigas), al mismo tiempo de los físicos con el asentamiento, ello

de la mano del personal especializado y competente para estudiar el comportamiento entre los dos tipos de muestras.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización del Agregado para Diseño

En este apartado, se realizó la notación y evaluación de los agregados de piedra caliza destinados para el diseño de concreto estructural, al aplicar la norma NTP 400.037 [16] se puede caracterizar las muestras de referencia de cada agregado, procesándolos y determinando si son aptos para su uso, esta normativa describe detalladamente los criterios a tomar para cada tipo de agregado, ya sea de tendencia a finos o gruesos. Para cada material se utilizaron una serie de tamices con diferentes dimensiones, en la cual para los agregados finos deberán pasar libremente por el tamiz con denominación “3/8” para consecuentemente generar el primer porcentaje retenido en la malla “N°4”, este proceso de retención del agregado será en cada una de las mallas hasta llegar a la N°200° la cual contará con un fondo que no deberá pasar de un 3%.

Así mismo, se considera la importancia del análisis granulométrico de los agregados, debido a que influye directamente en propiedades clave como la trabajabilidad, resistencia, durabilidad, economía y acabado superficial del concreto, donde una distribución óptima de partículas gruesas y finas permite obtener una mezcla trabajable, compacta y poco permeable, logrando un concreto de alta resistencia y durabilidad, a la vez que se optimiza el contenido de cemento y relación agua/cemento para mayor economía [17]. En este aspecto, se presentaron las propiedades del agregado de partículas finas (AF) utilizadas para la preparación del concreto, en la Tabla 1 se muestran los valores específicos.

Tabla 1. Características físicas del agregado fino. Fuente: los autores

PROPIEDADES FÍSICAS		
Módulo de finura	3,00	-
Tamaño máximo	9,50	3/8"
Tamaño máximo nominal	4,75	N°4
Porcentaje de Absorción	1,60	%
Peso Unitario (PUS)	1533	kg/m ³
Peso Unitario Compactado (PUC)	1770	kg/m ³
Tamaño de la muestra	957,60	g

La caracterización del agregado fino reveló aspectos adicionales considerables para el diseño de mezcla de concreto. Como se detalla en la Tabla 1, el porcentaje de absorción del agregado fino fue de 1,6%, lo cual exigió un ajuste en el diseño inicial al requerir un incremento en la cantidad de agua de mezclado. Asimismo, se determinaron los pesos unitarios, obteniendo un

valor de 1533 kg/m^3 para el estado suelto y 1770 kg/m^3 para el estado compactado. Tras analizar exhaustivamente los resultados de los ensayos realizados, incluyendo la distribución granulométrica, el módulo de finura y las propiedades físicas evaluadas, se concluyó que el material seleccionado cumplía con los requisitos necesarios para ser utilizado como agregado fino en la preparación del concreto.

Se presenta en la Figura 1 los límites granulométricos y la curva obtenidos siguiendo la norma NTP 400.037 [16] reveló que el material cumplía con los requisitos normativos vigentes en cuanto a la distribución de tamaños de partículas, esta curva mostró los porcentajes que pasaron a través de los tamices de 3/8" y dispersándose en los tamices como el material retenido hasta el N°100. El agregado representado por esta curva granulométrica una vez aprobado se utilizó para el diseño de la mezcla y la elaboración del concreto patrón, al cual se le incorporaron posteriormente adiciones de caucho molido como muestras experimentales.

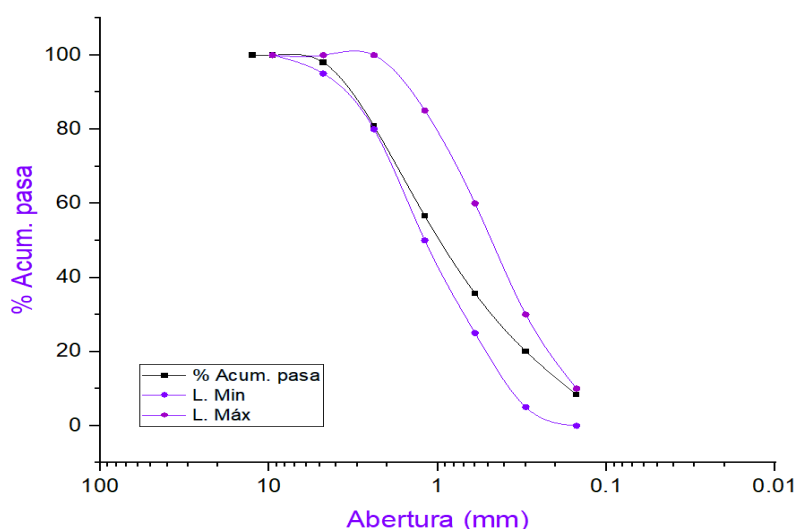


Figura 1. Límites granulométricos del agregado fino. Fuente: los autores

Por otro lado, se presentaron las propiedades del agregado de partículas gruesas (AG) utilizadas para la preparación del concreto, en la Tabla 2 se muestran los valores específicos:

Tabla 2. Características físicas del agregado grueso. Fuente: los autores

PROPIEDADES FÍSICAS		
Módulo de finura	7,47	-
Tamaño máximo	24,5	1 ½"
Tamaño máximo nominal	37,5	N°4
Porcentaje de Absorción	1,0	%
Peso Unitario (PUS)	1491	kg/m^3
Peso Unitario Compactado (PUC)	1623	kg/m^3
Tamaño de la muestra	2138,6	g

Respecto a la Tabla 2, se presenta los valores del agregado adquiridos durante los procesos de caracterización, teniendo como módulo de finura de 7,47, con la muestra de 2138.6 gramos se observó un porcentaje de absorción del 1%, donde al estar dentro del rango de 3% se procede

a ajustar el contenido de agua para evitar una deshidratación de la mezcla, posteriormente se obtuvo un PUS de 1491 kg/m^3 sin compactar, caso contrario del PUC con 1623 kg/m^3 . En el caso de la Figura 2, se expresa la curva granulométrica obtenida de la muestra mencionada anteriormente, en ella se observa los límites permisivos por la norma NTP 400.037 [16] así como la curva creada por el agregado en mención, teniendo como hito granulométrico al tamiz de $1 \frac{1}{2}$ " y posteriormente los tamaños inferiores.

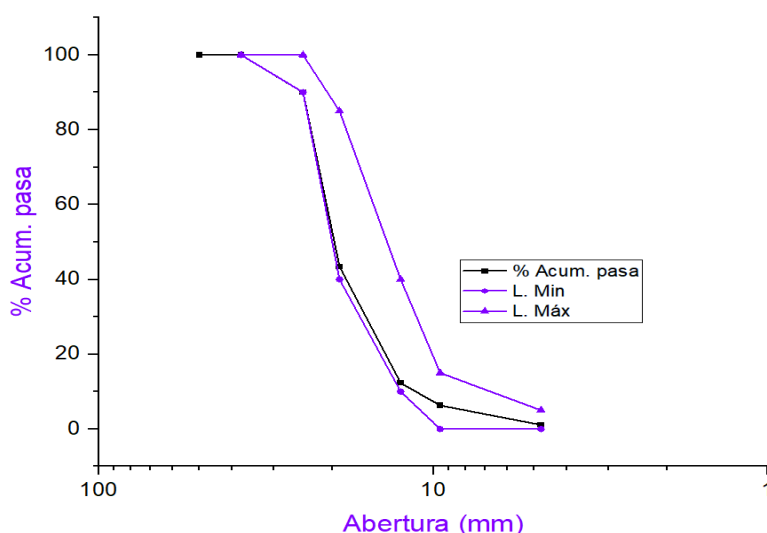


Figura 2. Límites granulométricos del agregado grueso. Fuente: los autores

4.2. Diseño ACI 211 del Concreto

Para la estructuración del concreto de este estudio se empleó la norma ACI 211 [15] con la finalidad de presentar un concreto requerido de 20,59 MPa de resistencia, este concreto estuvo compuesto de agua, agregados de gradaciones finas y gruesas, así como de cemento Portland tipo I, sin presencia de caucho molido debido a que este componente se empleó como diseño modificado experimental, como se consolida en la Tabla 3.

Tabla 3. Diseño de mezcla ACI 211. Fuente: los autores

Grupos	Agregado		Cemento	Agua	Caucho molido	Total
	Fino	Grueso				
Patrón (0%)	64,54	82,09	26,88	16,16	-	189,67
G1 (2,7%)	62,80	82,09	26,88	16,16	1,74	189,67
G2 (5,4%)	61,04	82,09	26,88	16,16	3,49	189,66
G3 (8,1%)	59,28	82,09	26,88	16,16	5,23	189,64

4.3. Evaluación de las Propiedades Mecánicas del Concreto con CM

A continuación, se ejecutaron los ensayos propuestos y dirigidos para el concreto con adición de CM, de esta forma se compara la muestra de mayor valor con los resultados del estándar.

Asentamiento del concreto

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos a partir del ensayo de asentamiento para la muestra patrón y muestras experimentales que contiene caucho molido (CM) en proporciones de 0; 2,7; 5,4 y 8,1% respecto al agregado fino categorizándose como G0, G1, G2 y G3, de los cuales, se demuestra que los grupos experimentales adquirieron una mejor trabajabilidad en contraste a la muestra patrón.

Tabla 4. Ensayo de asentamiento del patrón y experimentales. Fuente: los autores

Proporciones	Asentamiento			Promedio
	P1	P2	P3	
Patrón (0%)	3 ¾"	4	3 ¾"	3 ¾"
G1 (2,7%)	4	4	4 ¼"	4"
G2 (5,4%)	4 ¼"	4 ¼"	4 ¼"	4 ¼"
G3 (8,1%)	4 ¼"	4 ¼"	4 ¾"	4 ¼"

Resistencia a compresión

Las muestras evaluadas en el ensayo de resistencia a compresión fueron realizadas de acuerdo con la normativa ASTM C 39 [7] que indica la forma y dimensionamiento con fin de mantener resultados similares entre los grupos. Siendo que en la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos a partir del ensayo de compresión para la muestra patrón y muestras experimentales que contiene caucho molido (CM) en proporciones de 0; 2,7; 5,4 y 8,1% respecto al agregado fino categorizándose como G0, G1, G2 y G3.

Tabla 5. Ensayo de compresión del patrón y experimentales. Fuente: los autores

Proporciones	Resistencia a compresión (MPa)		
	7	14	28
Patrón (0%)	17,75	19,73	21,67
G1 (2,7%)	18,48	20,46	22,40
G2 (5,4%)	14,99	16,97	19,29
G3 (8,1%)	14,39	16,37	18,68

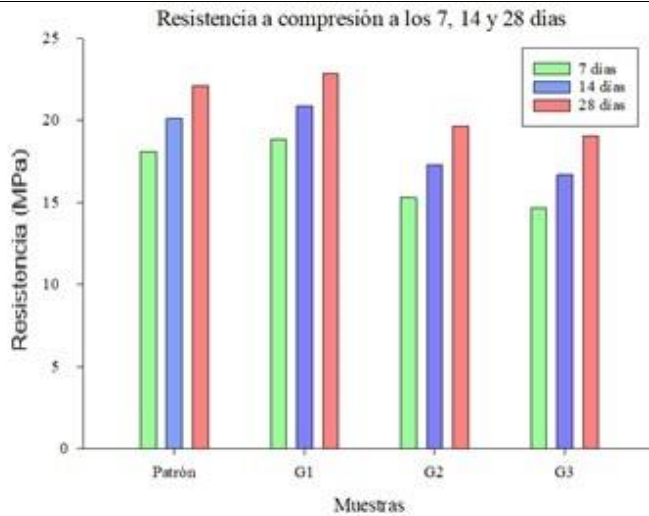


Figura 3. Resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días de maduración con y sin CM. Fuente: los autores

Por defecto, se muestra en la Figura 3 los valores de respuesta de los efectos compresivos del concreto a los 7, 14 y 28 días, este gráfico de barras diferencia las resistencias obtenidas para cada grupo evaluado, en donde el G1 que contiene 2,7% de CM alcanzó una resistencia de 22,39 MPa.

Resistencia a flexión

Las briquetas destinadas al ensayo de esfuerzo a flexión se seleccionarán rigurosamente conforme a la Norma Técnica Peruana ASTM C78 [8]. Se tomaron las medidas necesarias para acondicionar cada muestra, garantizando su plena conformidad con los requisitos normativos, este proceso meticuloso aseguró resultados confiables y libres de cualquier manipulación. A lo cual, en la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos a partir del ensayo de compresión para la muestra patrón y muestras experimentales que contiene caucho molido (CM) en proporciones de 0, 2,7, 5,4 y 8,1% respecto al agregado fino categorizándose como G0, G1, G2 y G3.

Tabla 6. Ensayo de flexión del patrón y experimentales. Fuente: los autores

Proporciones	Resistencia a flexión (MPa)		
	7	14	28
Patrón (0%)	3,74	4,02	4,75
G1 (2,7%)	4,00	4,29	5,01
G2 (5,4%)	3,27	3,56	4,28
G3 (8,1%)	2,86	3,15	3,88

En consecuencia, se muestra en la Figura 4 los valores de respuesta de los efectos compresivos del concreto a los 7, 14 y 28 días, este gráfico de barras diferencia las resistencias obtenidas para cada grupo evaluado, en donde el G1 que contiene 2,7% de CM alcanzó una resistencia de 4,29 MPa.

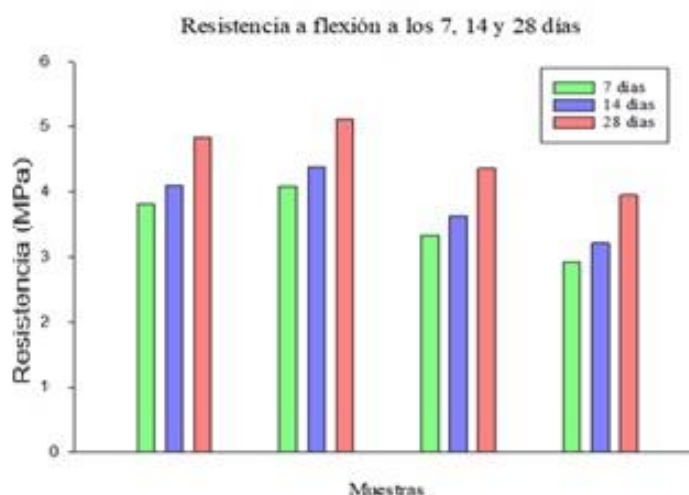


Figura 4. Resistencia a flexión a 7, 14 y 28 días de maduración con y sin CM. Fuente: los autores

4.4 Análisis de Comparativa entre Concreto Patrón y Concreto Experimental CM

Asentamiento

La Figura 5 muestra los valores promedio de las pruebas realizadas para cada grupo que fue evaluado (G0, G1, G2 y G3), donde el CM al reemplazar parcialmente al agregado fino contempla que los grupos G2 (5,4%) y G3 (8,1%) presentaron un mejor estado plástico que el G1 (2,7%) y G0.

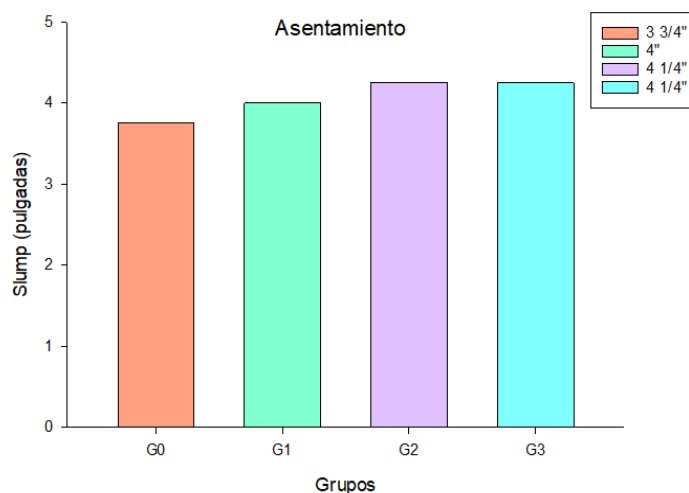


Figura 5. Comparación de muestras de concreto con y sin CM. Fuente: los autores

Se llega a observar en el ensayo de asentamiento entre patrón y muestras dosificadas que, a medida que se incrementa la administración de caucho (CM) la fluencia del concreto se incrementa proporcionalmente, partiendo desde el G1 con 4" pulgadas, mientras que la muestra de referencia obtuvo un promedio de 3 3/4", sin embargo, aun cuando los grupos G2 y G3 presentaron un mayor resultado que los grupos anteriores con 4 1/4" solo se exhibió una diferencia de 6,7% entre grupos experimentales y 13,33 con el patrón.

Resistencia a compresión

Ante los ensayos de fuerzas mecánicas a compresión del concreto, se constata en la Figura 6 los resultados promedio de cada grupo experimental con 2,7; 5,4 y 8,1% de CM, infiriéndose que el G1 presentó un mejor desempeño en comparación a los demás grupos al figurar una diferencia de 3,33%.

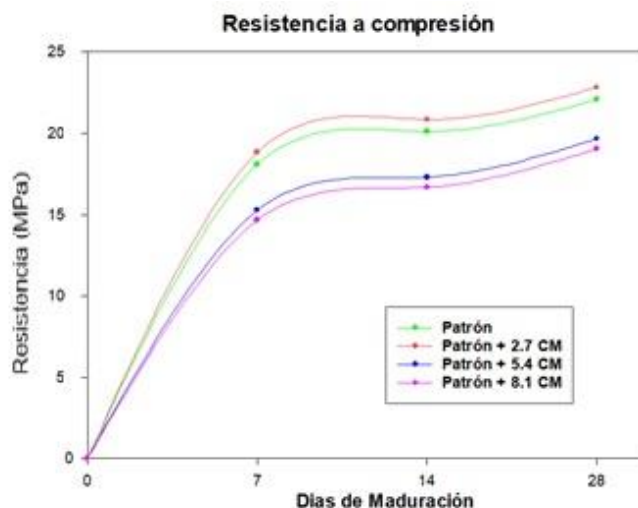


Figura 6. Comparación de muestras de concreto a compresión con y sin CM. Fuente: los autores

Resistencia a flexión

Se observa el comportamiento del concreto reemplazando porcentualmente al agregado fino con CM en valores de 2,7; 5,4 y 8,1% en la Figura 7, llevando a resultados mayores de 3,87 MPa del G3, se presentaron esfuerzos promedio de 5,01 MPa a favor del reemplazo de 2,7% de CM (G1) contra el patrón con una diferencia de 5,64%.

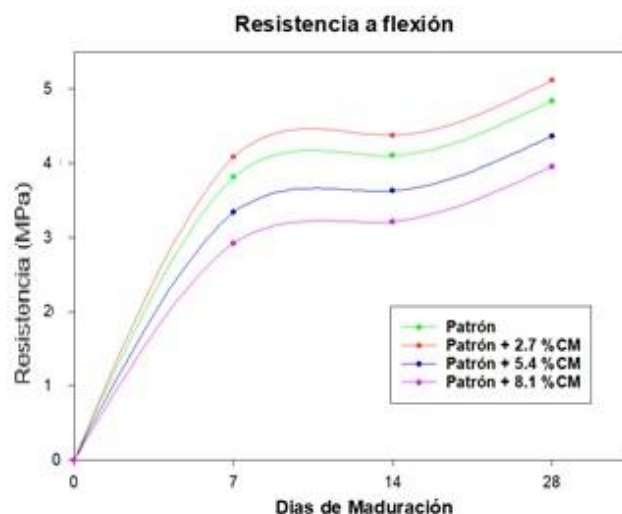


Figura 7. Comparación de muestras de concreto a flexión con y sin CM. Fuente: los autores

4.5. Análisis Estadístico

Análisis de varianzas de la resistencia a compresión

En la presente sección se muestra el ANOVA donde se demuestra la variación entre datos, con la finalidad de medir los valores y efectos adquiridos en campo, mediante un programa estadístico que proporcione la estimación de los porcentajes del caucho molido sobre las características del concreto. En la Tabla 7, se muestra que el valor p es 0,000, del cual, indica que es extremadamente improbable que la variabilidad observada entre los grupos se deba al

azar, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay una diferencia significativa entre las medias de los grupos, es decir, que sugiere una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula.

Tabla 7. *Análisis de varianza para resistencia a compresión. Fuente: los autores*

Fuente	GL	SC Ajust,	MC Ajust,	Valor F	Valor p
Factor	3	3036,35	1012,2	438,15	0,000
Error	8	18,48	2,31		
Total	11	3054,83			

Medias

En la siguiente sección se muestran las medias, del cual, nos proporciona una visión clara de las diferencias entre los grupos en términos de la media y la dispersión de los datos. En la Tabla 8, se observaron las medias obtenidas en base a los datos adquiridos, de los cuales, las diferencias en las medias, junto con los intervalos de confianza, evidencian que hay una variación significativa entre los grupos, lo que respalda la necesidad de una mayor investigación o intervención en función del contexto del estudio.

Tabla 8. *Medias para resistencia a compresión. Fuente: los autores*

Factor	N	Media	Desv, Est,	IC de 95%
Patrón	3	221,00	1,253	(218,976; 223,024)
G1	3	228,37	2,46	(226,34; 230,39)
G2	3	196,67	0,252	(194,643; 198,690)
G3	3	190,53	1,250	(188,510; 192,557)

Comparaciones por método de Tukey

En esta sección, se visualiza las comparaciones de resultados para determinar las diferencias significativas entre las medias de las muestras (Patrón, G1, G2 y G3). En la Tabla 9, se observa las comparaciones dadas por el método de Tukey, de los cuales, cada grupo se encuentra en una agrupación diferente, lo que significa que los efectos de los tratamientos o niveles del factor son distintos entre sí, no obstante, esta información es crucial para comprender la variabilidad y la efectividad de cada nivel del factor en el contexto del estudio y para guiar futuras decisiones basadas en estos resultados.

Tabla 9. *Comparaciones por Tukey para resistencia a compresión. Fuente: los autores*

Factor	N	Media	Agrupación
G1	3	228,37	A
Patrón	3	221,000	B
G2	3	196,667	C
G3	3	190,533	D

Gráfica de intervalos de medias

Esta gráfica de intervalos muestra los valores medios y los rangos de confianza para una variable de respuesta (posiblemente la resistencia a la compresión) correspondientes a un

patrón de referencia y tres grupos diferentes (G1, G2 y G3).

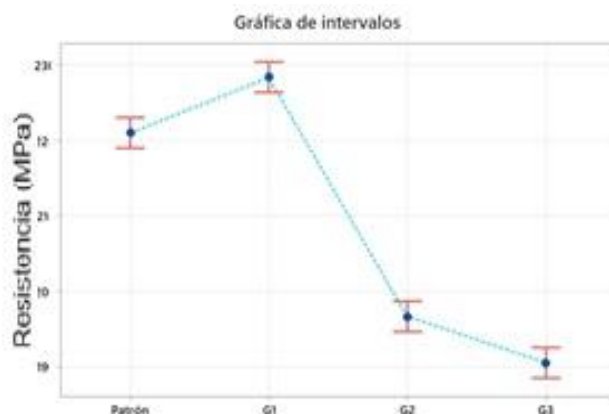


Figura 8. Gráfico de intervalos para resistencia a compresión. Fuente: los autores

En la Figura 8, se demuestra que hay diferencias significativas en la variable de respuesta entre los grupos evaluados, con una tendencia decreciente desde el patrón hasta el grupo G3, no obstante, el dato más alto de entre las demás muestras y al patrón es el G1 de manera notoria.

5. CONCLUSIONES

Mostrados los resultados a lo largo del documento, se encontró que en los ensayos mecánicos de compresión los esfuerzos del concreto con agregados de piedra caliza de Trapiche del norte de Carabayllo, junto con adiciones porcentuales de caucho molido en reemplazo parcial del agregado de gradación fina presentaron respuestas positivas en ciertos especímenes, donde el mayor esfuerzo compresor del concreto del estudio fue alcanzado por la muestra del grupo G1 de 2,7% de CM obteniendo un valor de 22,40 MPa ante un concreto patrón de 0% de CM con un valor de 221,67 MPa, manifestándose un incremento del 3,33% hacia el G1.

Por su parte, los ensayos flexores en la tercera etapa de evaluación mantuvieron datos aproximados a 5,01 MPa con el G1 (2,7%) en contraste a su concreto de categoría patrón con 4,75 MPa, ello generó una diferencia del 5,64% a favor del G1, sin embargo, los otros 2 grupos (G2 y G3) mostraron resultados menores al patrón; ergo el empleo de un complemento en la elaboración de una mezcla con el fin de conseguir una alternativa en el concreto resulta factible y sustentable.

Bajo ese contexto, los registros de los asentamientos característicos de los ensayos físicos del concreto mostraron valores positivos en todos los grupos de experimentación, siendo el G1 de 2,7% de CM el grupo de menor mejoría al presentar una media de 4" pulgadas, al mismo tiempo los grupos de adiciones de caucho del 5,4% y 8,1% contemplaron un asentamiento de

4 ¼”, con ello se observó que la administración de este material beneficia la fluencia del concreto desde un 6,67% hasta un 13,33%.

6. FINANCIAMIENTO

El financiamiento de la investigación fue a cargo de la autora en totalidad, así mismo, la ejecución de cada ensayo expuesto en el presente documento fue realizado en las inmediaciones del Laboratorio JJ GEOTECNIA S.A.C. (<https://jjgeotecniasac.com>).

7. CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no presencia de conflictos de interés intelectual ni participativo.

8. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización y metodología: R.J.L.S., L.C.F; pruebas: R.J.L.S.; supervisión: L.C.F.

9. REFERENCIAS

- [1] J. M. Mendoza Rangel y J. H. Díaz-Aguilera, “Economía circular en la industria latinoamericana del cemento y el concreto: una solución sustentable de diseño, durabilidad, materiales y procesos”, *Rev. ALCONPAT*, vol. 13, n.º 3, pp. 328–348, 2024
- [2] N. Garcia-Troncoso, H. Baykara, M. H. Cornejo, A. Riofrio, M. Tinoco-Hidalgo y J. Flores-Rada, “Comparative mechanical properties of conventional concrete mixture and concrete incorporating mining tailings sands”, *Case Stud. Construction Mater.*, vol. 16, 2022
- [3] A. Espinoza, B. Jiménez, J. Rodríguez y C. Eyzaguirre, “Mechanical Properties of an Eco-friendly Concrete with partial replacement of POC and Rubber”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 758, 2020
- [4] Y. Blikharsky, J. Selejdak, N. Kopiika y R. Vashkevych, “Study of Concrete under Combined Action of Aggressive Environment and Long-Term Loading”, *Materials*, vol. 14, N° 21, p. 6612, 2021
- [5] S. M. I. S. Zainal, D. Mattius, Z. Baba, A. N. Rizalman y F. Hejazi, “Improving the Performance of Lightweight Crumb Rubber Mortar Using Synthetic, Natural, and Hybrid Fiber Reinforcements”, *Fibers*, vol. 11, N° 1, 2023
- [6] M. Farfán y E. Leonardo, “Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante.”, *Rev. Ing. Construcción*, vol. 33, n.º 3, 2018
- [7] ASTM C39, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, *American Society for Testing and Materials*, USA, 2001
- [8] ASTM C78, “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third Point Loading)”, *American Society for Testing and Materials*, USA, 2002
- [9] ASTM C143, “Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete”,

- American Society for Testing and Materials, USA, 2015*
- [10] ASTM C33, “Standard Specification for Concrete Aggregates”, *American Society for Testing and Materials, USA, 2016*
 - [11] González, L. y Martínez, P. Sostenibilidad en la construcción: *Aplicación de caucho reciclado en concreto. Ciudad: Editorial Científica de Ingeniería, 2022*
 - [12] L. González y P. Martínez, “Adición de caucho molido como material constructivo para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas para un concreto sostenible” Editorial Científica de Ingeniería, Lima, Perú, 2023
 - [13] A. Ramos-Galarza, “Los Alcances de una investigación”, *CienciAmérica*, vol. 9, n.º 3, 2020
 - [14] E.060, “CONCRETO ARMADO” de Reglamento Nacional de Edificaciones, Ed. Sencico, 2019
 - [15] A. Chaubey, “ACI Method of Proportioning Concretes”, en *Practical Concrete Mix Design*, CRC Press, 2020
 - [16] NTP 400.037, “AGREGADOS. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto” Normas Técnicas Peruanas, 2014
 - [17] J. Góra y W. Piasta, “Impact of mechanical resistance of aggregate on properties of concrete”, *Case Stud. Construction Mater.*, vol. 13, 2020