

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Una Institución Adventista

Influencia de la incorporación de caucho reciclado en el concreto estructural y su respuesta sísmica hipotética, Juliaca 2021

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Por:

Jesús Vidal Quispe Justo

Yojan Huamantupa Mar

Asesor:

Ing. Juana Beatriz Aquisé Pari

Juliaca, noviembre de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

Ing. Juana Beatriz Aqise Pari, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: **“INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE CAUCHO RECICLADO EN EL CONCRETO ESTRUCTURAL Y SU RESPUESTA SÍSMICA HIPOTÉTICA, JULIACA 2021”** constituye la memoria que presentan los Bachilleres **Yojan Huamantupa Mar** y **Jesús Vidal Quispe Justo** para obtener el título de Profesional de Ingeniero Civil, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 10 días del mes de noviembre del año 2022



Ing. Juana Beatriz Aqise Pari

Asesor



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 08 dia(s) del mes de noviembre del año 2022, siendo las 17:00 horas, se reunieron en el Salon de Grados y Titulos de la Universidad Peruana Union, Filial Juliaca, bajo la direccion del Seior Presidente del jurado: Ing. Heron Quiberly Pari Lusi, el secretario: Mg. Efrain Velasquez Mamani y los demas miembros: Ing. Henry Antonio Aguilar Chuquinia y el asesor Ing. Juana Beatriz Aguirre Pari

con el proposito de administrar el acto academico de sustentacion de la tesis titulada: Influencia de la incorporacion de caucho reciclado en el concreto estructural y su respuesta sismica hipotetica, Juliaca 2021

de el(los)/la(las) bachiller(es): a) Yojan Huamantupa Mar b) Jesus Vidal Quipe Justo

conducente a la obtencion del titulo profesional de Ingeniero Civil (Nombre del Titulo Profesional)

con mencion en

El Presidente inicio el acto academico de sustentacion invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposicion. Concluida la exposicion, el Presidente invito a los demas miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emision del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedio a dejar constancia escrita sobre la evaluacion en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Yojan Huamantupa Mar

Table with columns: CALIFICACION, ESCALAS (Vigesimal, Literal, Cualitativa), Merito. Values: Aprobado, 14, C, Aceptable, Bueno.

Candidato (b): Jesus Vidal Quipe Justo

Table with columns: CALIFICACION, ESCALAS (Vigesimal, Literal, Cualitativa), Merito. Values: Aprobado, 15, B-, Bueno, Muy Bueno.

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invito al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluacion final y concluir el acto academico de sustentacion procediendose a registrar las firmas respectivas.

Signatures of Presidente, Asesor, Candidato(a) (a), Miembro, Secretario, and Candidato(a) (b).

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	vi
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
3.1. Caracterización de los componentes del concreto.	15
3.2. Resistencia a la compresión.	16
3.3. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión.....	17
3.3.1. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión con incorporación de caucho fino.....	17
3.3.2. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión con incorporación de caucho granulado	19
3.4. Resistencia a la tracción indirecta diametral.....	21
3.5. Análisis estadístico de la resistencia a la tracción indirecta diametral	22
3.5.1. Análisis estadístico de la resistencia a la tracción indirecta diametral con incorporación de caucho fino.....	22
3.5.2. Análisis estadístico de la resistencia a la tracción indirecta diametral con incorporación de caucho granulado	24
3.6. Módulo de elasticidad estático.....	25
3.7. Análisis estadístico del módulo de elasticidad estático	26
3.7.1. Análisis estadístico del módulo de elasticidad estático con incorporación de caucho fino.....	26
3.7.2. Análisis estadístico del módulo de elasticidad estático con incorporación de caucho granulado.	28
3.8. Análisis de la respuesta sísmica hipotética de la edificación con los resultados óptimos.....	30
3.9. Porcentaje de mejora de la respuesta sísmica hipotética de la edificación con los óptimos resultados.	31
4. CONCLUSIONES.....	33
5. REFERENCIAS	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de muestras a nivel exploratorio.....	11
Tabla 2. Nomenclatura de las briquetas.....	12
Tabla 3. Patrones de carga y valores.	14
Tabla 4. Datos para el análisis sísmico estático	14
Tabla 5. Densidad de los materiales.	15
Tabla 6. Resumen de las características de los agregados.....	15
Tabla 7. Dosificación de mezcla concreto $f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ con una relación a/c de 0.558.	15
Tabla 8. Dosificación del concreto con caucho reciclado.	16
Tabla 9. Análisis de varianza.....	17
Tabla 10. Análisis comparativo utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%..	18
Tabla 11. Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.....	19
Tabla 12. Análisis de varianza.....	19
Tabla 13. Grupos de información utilizando el método de Tukey a una confianza de 95%.	20
Tabla 14. Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.....	21
Tabla 15. Análisis de varianza.....	22
Tabla 16. Grupos de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.	23
Tabla 17. Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.....	24
Tabla 18. Análisis de varianza.....	24
Tabla 19. Grupos de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.	24
Tabla 20. Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.....	25
Tabla 21. Análisis de varianza.....	27
Tabla 22. Grupos de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.	27
Tabla 23. Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.....	28
Tabla 24. Análisis de varianza.....	28
Tabla 25. Grupos de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.	29
Tabla 26. Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.....	29
Tabla 27. Resumen de resultados óptimos obtenidos.....	30
Tabla 28. Derivas máximas (Sismo X-X) y % de mejora.	32
Tabla 29. Derivas máximas (Sismo y-y) y % de mejora.	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partículas de caucho fino y granulado.	12
Figura 2. Configuración y distribución de los elementos estructurales.....	14
Figura 3. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión.	16
Figura 4. Resistencia a la compresión con incorporación de caucho fino.....	18
Figura 5. Resistencia a la compresión con incorporación de caucho granulado.	20
Figura 6. Resultados del ensayo resistencia a la tracción indirecta diametral.....	21
Figura 7. Resistencia a la tracción indirecta diametral vs % de caucho fino.	23
Figura 8. Resistencia a la tracción indirecta diametral vs % de caucho Granulado.	25
Figura 9. Resultados del ensayo módulo de elasticidad estático	26
Figura 10. Modulo de elasticidad estático vs % de caucho fino.....	27
Figura 11. Modulo de elasticidad estático vs % de caucho granulado.....	29
Figura 12. Derivas inelasticas sismo x-x con incorporacion de caucho reciclado.	30
Figura 13. Derivas inelasticas sismo y-y con incorporacion de caucho reciclado.	31
Figura 14. Peso de la edificación evaluada con los óptimos porcentajes de caucho.	31

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Evidencia de sumisión a una revista indexada.....	¡Error! Marcador no definido.
--	--------------------------------------

Influencia de la incorporación de caucho reciclado en el concreto estructural y su respuesta sísmica hipotética, Juliaca 2021

RESUMEN

La presente investigación, se planteó con el objetivo general de determinar la influencia de la incorporación de caucho reciclado en el concreto estructural y su respuesta sísmica hipotética, desarrollando la investigación bajo un tipo de investigación aplicada, de diseño experimental puro con una muestra no probabilística de método DBCA de 84 briquetas que incluyen al concreto patrón con un diseño 210 kgf/cm² y concreto con incorporación de caucho reciclado al 2%, 4% y a 6% los cuales fueron evaluados a los 7, 14 y 28 días de edad bajo la técnica de la observación directa, los parámetros como la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta diametral donde los resultados demostraron que la incorporación más óptima fue de 4% de caucho tanto fino como granulado a los 28 días en todos los parámetros superando la resistencia a la compresión en un 3.76% y 4.14%, así también la resistencia a la tracción indirecta diametral en un 8.98% y 16.05% respecto al concreto patrón y de acuerdo con el análisis de la respuesta sísmica hipotética con los porcentajes de caucho óptimos encontrados, se determinó un porcentaje de mejora con la incorporación de caucho al 4% tanto fino como granulado en las derivas máximas para el sentido X-X 3.44% y 3.87%, así mismo para el sentido Y-Y del 3.47% y 3.96% respectivamente en comparación con el concreto patrón. Demostrando así que es aceptable el uso de caucho al 4% tanto fino como granulado en el concreto.

Palabras clave: Concreto, caucho reciclado, comportamiento mecánico, módulo de elasticidad, respuesta sísmica.

ABSTRACT

The present investigation was raised with the general objective of determining the influence of the incorporation of recycled rubber in structural concrete and its hypothetical seismic response, developing the investigation under a type of applied investigation, of pure experimental design with a non-probabilistic sample of DBCA method of 84 briquettes that include the standard concrete with a design of 210 kgf/cm² and concrete with the incorporation of recycled rubber at 2%, 4% and 6%, which were evaluated at 7, 14 and 28 days of age under the technique From direct observation, parameters such as resistance to compression and indirect diametral traction where the results showed that the most optimal incorporation was 4% of both fine and granulated rubber at 28 days in all parameters, surpassing the resistance to compression by 3.76% and 4.14%, as well as the diametral indirect tensile strength by 8.98% and 16.05% with respect to the standard concrete and according to or with the analysis of the hypothetical seismic response with the optimal rubber percentages found, an improvement percentage was determined with the incorporation of 4% rubber, both fine and granulated, in the maximum drifts for the X-X direction 3.44% and 3.87%, as well same for the Y-Y direction of 3.47% and 3.96% respectively compared to the concrete pattern. Thus demonstrating that the use of 4% rubber, both fine and granulated, in concrete is acceptable.

Keywords: Concrete, recycled rubber, mechanical behavior, modulus of elasticity, seismic response.

1. INTRODUCCIÓN

Los neumáticos en desuso se encuentran entre las fuentes de desechos más grandes y problemáticas de las sociedades modernas, debido a su durabilidad y a los enormes volúmenes de llantas desechadas cada año (Youssf, ElGawady, & Mills, 2015). Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2016), en el lapso 2011 – 2014 el parque automotor creció anualmente a una tasa promedio del 8.84%, pasando de 2 523,441 vehículos en el 2011 a 3 252,714 en el 2014, lo cual produjo un incremento exponencial de los neumáticos en desuso. Asimismo Farfán y Leonardo, (2018) mencionan que en el Perú, el problema ambiental de votar llantas usadas es producto del poco interés en temas de gestión de residuos tanto por causas culturales como por la carencia de políticas e indagaciones sobre el reciclaje y disposición final de esta clase de residuo. Por otra parte según Gibreil & Feng, (2017) el concreto debido a su facultad para adquirir cualquier forma es el componente más empleado en la rama de la construcción a nivel mundial, esto trae como resultado un gasto excesivo de las materias primas que lo conforman. En ese sentido el reciclaje de llantas usadas conserva valiosos recursos naturales y reduce la cantidad de caucho que ingresa al vertedero (Guo et al., 2014).

Es de resaltar también que los eventos sísmicos generan el colapso de estructuras, además de pérdidas económicas y vidas humanas (Pnevmatikos et al., 2020). En la actualidad según la norma técnica E.030, publicada por (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2018) la ciudad de Juliaca se localiza en una zona sísmica 03, lo cual indica que hay probabilidades de sufrir un movimiento telúrico.

Bajo este escenario nuestro objetivo es determinar la influencia de la incorporación de caucho reciclado en el concreto estructural y analizar su respuesta sísmica hipotética caracterizando los componentes del concreto y evaluando las propiedades mecánicas del concreto con incorporación de caucho reciclado y así mismo con los resultados óptimos realizar un análisis de su respuesta sísmica hipotética.

Siendo el caucho, un material investigado en la elaboración de concreto, así tenemos a Ghosh y Bera, (2016) los cuales muestran que el caucho en desecho se puede usar en el concreto

como reemplazo parcial de agregados gruesos y finos, obteniendo resultados que están en el límite aceptable.

Más recientemente la investigación de Farfán & Leonardo, (2018) encontraron que el porcentaje óptimo de caucho reciclado incorporado en el concreto para lograr la resistencia máxima a la compresión es 5% (218.45kgf/cm^2) y para lograr la resistencia máxima a la flexión es 10% (81.86kgf/cm^2); además mencionan que es factible el uso del caucho reciclado en estructuras donde hay poca intensidad sísmica.

Según Novillo et al., (2017) encontraron que el 10% de caucho reciclado incorporado en el concreto presenta mejores valores en la resistencia a la compresión y a la tracción, además observaron una disminución de su densidad. También dedujeron que para la elaboración de un metro cúbico de concreto de densidad (2276kg/m^3) se necesitara 90kg de caucho, teniendo en cuenta que el peso de un neumático normal es de 10kg se necesitaría entonces 9 neumáticos por cada metro cúbico de concreto aproximadamente.

Asimismo Pelisser et al., (2011) concluyeron de que el caucho de neumáticos reciclados es un excelente agregado que junto al hidróxido de sodio y humo de sílice mejora la resistencia a la compresión y determinaron que este se redujo solo en un 14% a los 28 días en comparación con el hormigón convencional, llegando a 490kgf/cm^2 para la mezcla de mayor resistencia.

Por su parte Kara De Maeijer et al., (2021) mencionan que se puede hacer aplicación de caucho reciclado como reemplazo de agregados naturales y que depende del tratamiento de su superficie y de la optimización del diseño de mezcla. Encontraron que el rango óptimo de reemplazo de caucho reciclado basado en las propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad podría variar entre el 10% y el 20% para el reemplazo de agregados finos y el 5% para el reemplazo de agregados gruesos. Del mismo modo Safan et al., (2017) realizaron un estudio de propiedades de caucho en hormigón con sustitución de 5, 10 y 15% por volumen de arena, donde los resultados mostraron una mayor resistencia a la compresión, a la flexión, a la tracción y módulo de elasticidad, y que la utilización de caucho en la construcción podría ayudar en reducir costos y resuelve el desperdicio sólido de estas materias y así poder cuidar el medio ambiente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Siendo la investigación de tipo aplicada el cual según Carrasco Díaz, (2008) consiste en investigar para actuar, transformar, modificar o producir cambios en un determinado sector de la realidad, en este caso el concreto estructural.

Por otro lado, la investigación se clasifica en un diseño experimental puro que consiste en la manipulación intencional de las variables para determinar el causa y efecto de estas (Hernández - Sampieri & Mendoza, 2018).

La investigación se realizó en la ciudad de Juliaca, provincia de San Román de la región de Puno, utilizando el laboratorio Geotecnia Puno E.I.R.L. ubicada en el Jr. Tiahuanaco. Como población de la presente investigación tenemos a los concretos usados en la ciudad de Juliaca de uso estructural, en este caso se optó por un concreto de resistencia $f'c=210 \text{ kgf/cm}^2$, usando los parámetros de resistencia mínima del concreto estructural este no debe ser menor a 173 kgf/cm^2 , así también según el Reglamento Nacional de Edificaciones E.060 y las disposiciones especiales para el diseño sísmico mostrado en el acápite 21.3.1 sugiere que el $f'c$ no debe ser inferior a 210 kgf/cm^2 .

Para la determinación de la muestra se optó por el tipo no probabilístico bajo el método diseño de bloques completos al azar mostrado en la tabla 1 y su nomenclatura en la tabla 2.

Tabla 1.

Número de muestras a nivel exploratorio.

Diseño	Proporción de caucho reciclado	Resistencia a la compresión			Resistencia a la tracción indirecta diametral 28 días	Parcial	Total
		7 días	14 días	28 días			
CP-S/C	0 %	3	3	3	3	12	84
C.- 2% C.F.	2 %	3	3	3	3	12	
C.- 4% C.F.	4 %	3	3	3	3	12	
C.- 6% C.F.	6 %	3	3	3	3	12	
C.- 2% C.G.	2 %	3	3	3	3	12	
C.- 4% C.G.	4 %	3	3	3	3	12	
C.- 6% C.G.	6 %	3	3	3	3	12	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.*Nomenclatura de las briquetas.*

Código	Designación
CP-S/C	Concreto patrón sin caucho.
C. - 2% C.F.	Concreto con 2% del peso de la arena sustituida por caucho fino.
C.- 4% C.F.	Concreto con 4% del peso de la arena sustituida por caucho fino.
C. - 6% C.F.	Concreto con 6% del peso de la arena sustituida por caucho fino.
C. - 2% C.G.	Concreto con 2% del peso de la arena sustituida por caucho Granulado.
C. - 4% C.G.	Concreto con 4% del peso de la arena sustituida por caucho Granulado.
C. - 6% C.G.	Concreto con 6% del peso de la arena sustituida por caucho Granulado.

Fuente: Elaboración propia

Para cumplir con los objetivos planteados se realizó la caracterización de los agregados fino y grueso; y con estos materiales se realizó el diseño de mezcla por el método ACI 211, para las pruebas de resistencia a la compresión y resistencia a la tracción indirecta diametral se elaboraron briquetas de 150mm de diámetro y 300mm de alto.

Para la caracterización de los agregados se utilizó la norma ASTM C33. Las gravas y arenas provienen de la cantera Cabanillas, se les realizaron las pruebas de análisis granulométrico, gravedad específica y absorción, pesos unitarios y abrasión, según las normas ASTM C-136, ASTM C-127-128, ASTM C-29 Y ASTM C-131 respectivamente. El cemento utilizado fue RUMI (Tipo IP) y el agua usada para el mezclado y curado de las briquetas se usó de la red de agua para consumo humano de la ciudad de Juliaca. El caucho reciclado fue obtenido de neumáticos en desecho de botaderos y talleres reencauchadoras, se usó como caucho fino el material retenido en el tamiz N°50 y como caucho granulado el material retenido en el tamiz N°8 figura 1.

**Figura 1:** Partículas de caucho fino y granulado.**Fuente:** Elaboración propia

Así mismo para las pruebas de densidad, absorción y porosidad, resistencia a la compresión y resistencia a la tracción indirecta diametral se usaron las normas ASTM C- 642, ASTM C- 39 y ASTM C 496 respectivamente, en cuanto al módulo de elasticidad estático se determinó considerando la fórmula 8.3 del R.N.E. E.60 el cual está en función de la resistencia a la compresión alcanzada.

La técnica de recolección de datos fue la observación directa. Es así como se consiguieron los datos necesarios para procesarlos por medio de hojas de cálculo (formatos) para cada tipo de ensayo, y conseguir los resultados buscados en la presente investigación.

De igual forma, para el procesamiento de datos se utilizó la técnica de análisis de varianza ANOVA con el software MINITAB 18, el cual, según Amat Rodrigo, (2016) es el test estadístico a emplear cuando se desea comparar las medias de dos o más grupos. Asimismo, se utilizó la prueba de Tukey el cual, según García et al., (2001) crea intervalos de confianza para todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores mientras controlan la tasa de error por familia en un nivel especificado.

Finalmente, para el análisis de la respuesta sísmica hipotética de la edificación con los resultados óptimos se determinó por medio de un cálculo manual siguiendo el método de masas concentradas y un análisis sísmico estático, para lo cual se estableció una estructura regular de uso vivienda, el cual se compone de 4 niveles.

Se consideró para el primer nivel una altura de 3.20m y 3m para los niveles superiores, se compone de un sistema de pórticos, sus columnas son de sección $0.60 \times 0.60 \text{ m}^2$, las vigas son de sección $0.30 \times 0.60 \text{ m}^2$ en ambas direcciones X y Y, así mismo una losa maciza de 0.15m. Finalmente se muestra la configuración y distribución de los elementos estructurales en la figura 2. Así mismo en la tabla 3 se presenta los patrones de carga.

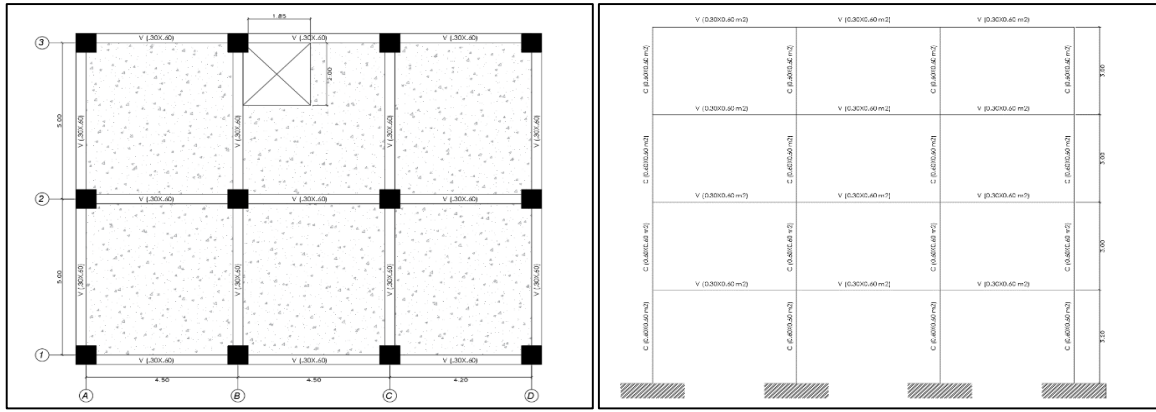


Figura 2: Configuración y distribución de los elementos estructurales.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.

Patrones de carga y valores.

Tipo de carga	Símbolo	Valor
Acabados	CM	100 kg/m ²
Tabiquería	CM	100 kg/m ²
Sobrecarga	CV	200 kg/m ²
Sobrecarga azotea	CV	150 kg/m ²

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis sísmico estático se muestra los datos en la tabla 4. Asimismo, para la estimación del peso de la edificación se realizó con lo señalado en el artículo 26 del RNE E.030, el cual corresponde a una edificación de categoría (C), el peso se calcula adicionando a la carga permanente y total de la edificación un porcentaje de carga viva del 25%.

Tabla 4.

Datos para el análisis sísmico estático.

Datos	Parámetros	Valores
Zona	Z	0.35
Uso	U	1.0
Suelo	S	1.15
Factor de amplificación sísmica	C	2.5
Sistema estructural	R	8

Fuente: Elaboración propia

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de los componentes del concreto.

Mediante pruebas de laboratorio en la tabla 5 se muestra la densidad de los materiales, de igual forma en la tabla 6 se muestra las características obtenidas de los agregados.

Tabla 5.
Densidad de los materiales.

Material	Densidad (gr/cm ³)
Cemento	2.90
Agua	1.00
Caucho	1.02

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.
Resumen de las características de los agregados.

Propiedad	Unidad	Agregado fino	Agregado grueso
Peso unitario seco compactado	(kg/m ³)	1713	1359
Peso unitario seco suelto	(kg/m ³)	1613	1228
Peso específico de la masa	(kg/m ³)	2623	2626
Contenido de humedad	(%)	1.600	1.620
Porcentaje de absorción	(%)	3.520	2.430
Módulo de fineza		3.241	7.987
Tamaño máximo nominal	pulg.	---	3/4"

Fuente: Elaboración propia

Teniendo las características de los agregados, se realizó el diseño de mezcla para un $f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ siguiendo el método ACI 211, obteniéndose la dosificación por metro cubico mostrado en la tabla 7.

Tabla 7.
Dosificación de mezcla concreto $f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ con una relación a/c de 0.558.

Material	Valor	Unidad
Cemento	369.90	kg/m ³
Agregado grueso	1044.77	kg/m ³
Agregado fino	687.84	kg/m ³
Agua	206	lt/m ³

Fuente: Elaboración propia

Por consiguiente, se muestra en la tabla 8 los tipos de dosificaciones de los concretos con incorporación de caucho.

Tabla 8.*Dosificación del concreto con caucho reciclado.*

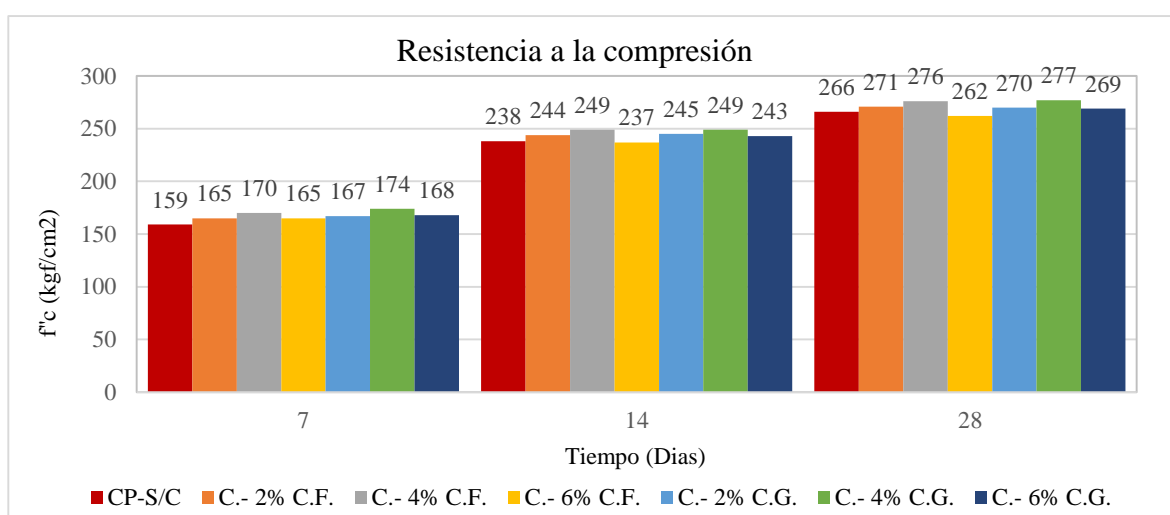
Tipos de concreto	Cemento (kg/m ³)	Piedra (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	Caucho (kg/m ³)
CP-S/C	369.9	1044.77	687.84	0
C. - 2% C.F.	369.9	1044.77	674.08	5.35
C. - 4% C.F.	369.9	1044.77	660.33	10.70
C. - 6% C.F.	369.9	1044.77	646.57	16.05
C. - 2% C.G.	369.9	1044.77	674.08	5.35
C. - 4% C.G.	369.9	1044.77	660.33	10.70
C. - 6% C.G.	369.9	1044.77	646.57	16.05

Fuente: Elaboración propia

3.2. Resistencia a la compresión.

Según Pasquel, (1998), es la aptitud de aguantar cargas y esfuerzos, por medio de las propiedades adherentes de la pasta de cemento. Está ligado primordialmente a la concentración de la pasta de cemento, que se frecuenta expresar en relación agua/cemento.

En la figura 3 se muestra el resumen de los ensayos a compresión de los especímenes.

**Figura 3:** Resultados del ensayo de resistencia a la compresión.**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 3 se observa que la resistencia del concreto con incorporación de 2% y 4% de caucho reciclado tanto fino como granulado poseen los mayores valores respecto al concreto patrón, así también lo confirman Novillo et al., (2017), quienes encontraron que el 10% de caucho reciclado incorporado en el concreto supera a la resistencia en estudio a los 28 días. Asimismo Farfán & Leonardo, (2018) obtuvieron la máxima resistencia a la compresión con la incorporación de 5% de caucho reciclado.

Por otra parte Pelisser et al., (2011) encontraron que el caucho reciclado junto con el hidróxido de sodio y humo de sílice mejora la resistencia a la compresión.

3.3. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión.

Al realizar la investigación, se plantea dos hipótesis, la alterna muestra que, al agregar el caucho fino o granulado, la resistencia de la compresión mejora significativamente y la hipótesis nula menciona que, por más que se agregue la cantidad de caucho fino o granulado la resistencia será siempre igual; al tener dichas hipótesis se ejecuta el análisis de resultados con la prueba Tukey de análisis de varianza.

3.3.1. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión con incorporación de caucho fino.

Al procesar los 36 tratamientos en relación con el concreto patrón, presentamos el análisis de varianza cuyo valor P es de 0.000 menor a 0,05; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Así mismo según la tabla 9 se muestra un valor F calculado de 777.30 que es mayor al valor F crítico 2.22.

Tabla 9.
Análisis de varianza.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados ajustado	Cuadrados medios ajustado	Valor F	Valor p
Tratamientos	11	71014.9	6455.90	777.30	0.000
Error	24	199.3	8.31		
Total	35	71214.2			

Fuente: Elaboración propia

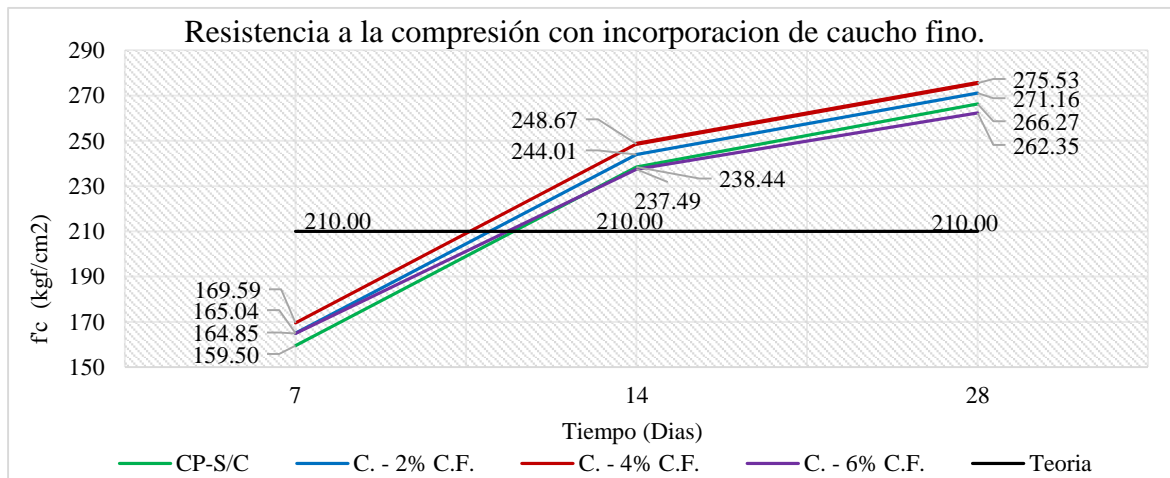
Del análisis en la tabla 9 se deduce que la incorporación de 2% 4% y 6% de caucho fino mejora la resistencia a la compresión en base al incremento de dicho agregado respecto al concreto patrón de 210 kgf/cm². Lo que afirma que hay diferencia entre las medias de los tratamientos de la investigación, así también se muestra por el método Tukey la agrupación de medias en la tabla 10.

Tabla 10.*Análisis comparativo utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.*

Tratamientos	N	Media	Agrupación
C.- 4% C.F. (28 días)	3	275.53	A
C.- 2% C.F. (28 días)	3	271.16	A B
CP-S/C (28 días)	3	266.27	B
C.- 6% C.F. (28 días)	3	262.35	B
C.- 4% C.F. (14 días)	3	248.67	C
C.- 2% C.F. (14 días)	3	244.01	C D
CP-S/C (14 días)	3	238.44	D
C.- 6% C.F. (14 días)	3	237.49	D
C.- 4% C.F. (7 días)	3	169.59	E
C.- 6% C.F. (7 días)	3	164.85	E F
C.- 2% C.F. (7 días)	3	165.04	E F
CP-S/C (7 días)	3	159.50	F

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 10 se observa que la resistencia más óptima es al 4% y 2% de caucho fino en 28 días, cuyas medias se encuentra en la agrupación “A” con una resistencia a la compresión de 275.53 y 271.16 kgf/cm² respectivamente. Para más detalles se muestra el comportamiento de las resistencias a la compresión en los 7, 14 y 28 días de edad en la figura 4.

**Figura 4:** Resistencia a la compresión con incorporación de caucho fino.**Fuente:** Elaboración propia

El comportamiento de las resistencias con la incorporación de caucho al 2%, 4% y 6% tuvieron un acelerado incremento de resistencia de 7 a 14 días y una disminución de 14 a 28 días de edad, teniendo entre si un comportamiento homogéneo figura 4. En la tabla 11, se presenta las probabilidades estadísticas de máximos y mínimas resistencias que se podría llegar según las condiciones en el campo de trabajo; por consiguiente, muestra que la

incorporación de caucho al 4% en 28 días es el más óptimo, con una media de 275.53 kgf/cm², el cual tiene la posibilidad de llegar a una resistencia máxima de 279.10 kgf/cm², como también se puede quedar solo en 272.23 kgf/cm².

Tabla 11.

Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.

Tratamientos	N	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza de 95%
C.- 2% C.F. (14 días)	3	244.01	1.73	(240.57; 247.43)
C.- 2% C.F. (28 días)	3	271.16	3.46	(267.57; 274.43)
C.- 2% C.F. (7 días)	3	165.04	2.00	(161.57; 168.43)
C.- 4% C.F. (14 días)	3	248.67	3.21	(245.23; 252.10)
C.- 4% C.F. (28 días)	3	275.53	3.06	(272.23; 279.10)
C.- 4% C.F. (7 días)	3	169.59	3.06	(165.90; 172.77)
C.- 6% C.F. (14 días)	3	237.49	3.79	(233.90; 240.77)
C.- 6% C.F. (28 días)	3	262.35	4.93	(259.23; 266.10)
C.- 6% C.F. (7 días)	3	164.85	1.73	(161.57; 168.43)
CP-S/C (14 días)	3	238.44	1.53	(234.899; 241.767)
CP-S/C (28 días)	3	266.27	1.16	(262.899; 269.767)
CP-S/C (7 días)	3	159.50	2.52	(155.90; 162.77)

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión con incorporación de caucho granulado

Al procesar los 36 tratamientos en relación al concreto patrón, presentamos el análisis de varianza cuyo valor P es de 0.000 menor a 0,05; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Así también en la tabla 12 se muestra un valor F calculado de 878.64 que es mayor al valor F crítico 2.22.

Tabla 12.

Análisis de varianza.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados ajustado	Cuadrados medios ajustado	Valor F	Valor p
Tratamientos	11	70387.9	6398.9	878.64	0.000
Error	24	174.8	7.28		
Total	35	70562.7			

Fuente: Elaboración propia

Del análisis en la tabla 12 se deduce que la incorporación de 2% 4% y 6% de caucho granulado mejora la resistencia a la compresión en base al incremento de dicho agregado respecto al concreto patrón de 210 kgf/cm². Lo que afirma que hay diferencia entre las

medias de los tratamientos de la investigación, así también se muestra por el método Tukey la agrupación de medias en la tabla 13.

Tabla 13.

Grupos de información utilizando el método de Tukey a una confianza de 95%.

Tratamientos	N	Media	Agrupación
C.- 4% C.G. (28 días)	3	276.68	A
C.- 2% C.G. (28 días)	3	270.28	A B
C.- 6% C.G. (28 días)	3	269.31	A B
CP-S/C (28 días)	3	266.27	B
C.- 4% C.G. (14 días)	3	249.25	C
C.- 2% C.G. (14 días)	3	244.77	C D
C.- 6% C.G. (14 días)	3	243.03	C D
CP-S/C (14 días)	3	238.44	D
C.- 4% C.G. (7 días)	3	173.84	E
C.- 6% C.G. (7 días)	3	167.56	E
C.- 2% C.G. (7 días)	3	166.58	E F
CP-S/C (7 días)	3	159.50	F

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 13 se observa que la resistencia más óptima es al 4%, 2% y 6% de caucho granulado a los 28 días, cuyas medias se encuentra en la agrupación “A” los cuales muestran una resistencia a la compresión de 276.68 kgf/cm², 270.28 kgf/cm² y 269.31 kgf/cm² respectivamente. Para más detalles se muestra en la figura 5 el comportamiento de las resistencias a la compresión a los 7, 14 y 28 días de edad.

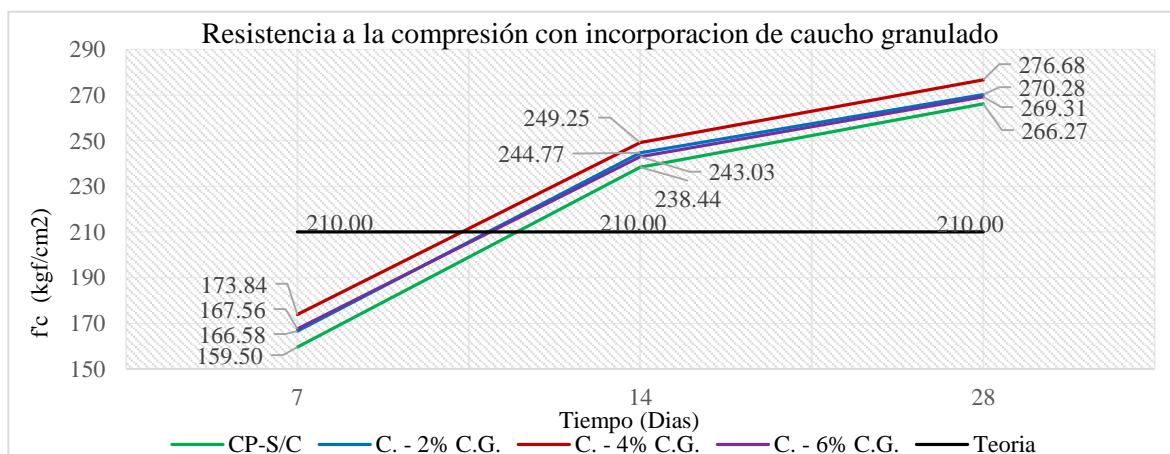


Figura 5: Resistencia a la compresión con incorporación de caucho granulado.

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 5 el comportamiento de las resistencias con incorporación de caucho al 2%, 4% y 6% tuvieron una velocidad de incremento significativo entre los días 7

y 14 días y esta se redujo entre los 14 y 28 días teniendo entre si un comportamiento homogéneo figura 5. Así también en la tabla 14, se presenta las probabilidades estadísticas de máximos y mínimas resistencias que se podría llegar según las condiciones en el campo de trabajo; por consiguiente, muestra que la incorporación de caucho al 4% en 28 días es el más óptimo con una media de 276.68 kgf/cm², el cual tiene la posibilidad de llegar a una resistencia máxima de 279.90 kgf/cm², como también se puede quedar solo en 273.47 kgf/cm².

Tabla 14.

Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.

Tratamientos	N	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza de 95%
C.- 2% C.G. (14 días)	3	244.77	2.58	(241.55; 247.98)
C.- 2% C.G. (28 días)	3	270.28	3.14	(267.06; 273.49)
C.- 2% C.G. (7 días)	3	166.58	0.974	(163.37; 169.80)
C.- 4% C.G. (14 días)	3	249.25	3.98	(246.04; 252.47)
C.- 4% C.G. (28 días)	3	276.68	4.72	(273.47; 279.90)
C.- 4% C.G. (7 días)	3	173.84	0.541	(170.63; 177.06)
C.- 6% C.G. (14 días)	3	243.03	3.1	(239.81; 246.25)
C.- 6% C.G. (28 días)	3	269.31	3.3	(266.09; 272.52)
C.- 6% C.G. (7 días)	3	167.56	1.013	(164.34; 170.77)
CP-S/C (14 días)	3	238.44	1.528	(235.12; 241.55)
CP-S/C (28 días)	3	266.27	1.155	(263.12; 269.55)
CP-S/C (7 días)	3	159.50	2.52	(156.12; 162.55)

Fuente: Elaboración propia

3.4. Resistencia a la tracción indirecta diametral

Según Vargas, (2016) este ensayo radica en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando una carga de forma uniforme durante dos líneas o generatrices opuestas hasta hallar la rotura. De este modo se muestra el resumen de los ensayos a resistencia a la tracción indirecta diametral de los especímenes en la figura 6.

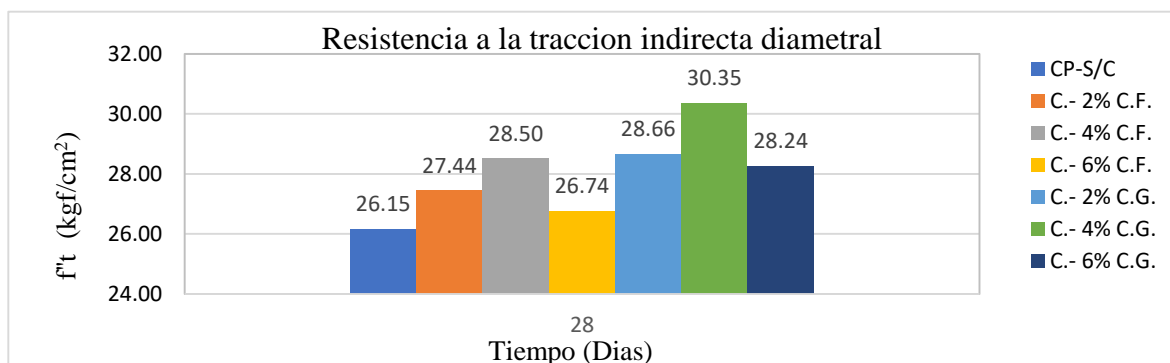


Figura 6: Resultados del ensayo resistencia a la tracción indirecta diametral.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 6 se observa que la resistencia a la tracción indirecta diametral del concreto con incorporación de 2% y 4% de caucho reciclado tanto fino como granulado poseen los mayores valores respecto al concreto patrón, así también lo confirman Verzeghassi et al., (2011) quienes encontraron que el 1% y 3% de caucho reciclado en el concreto a los 7 días de edad presenta una mejoría en la resistencia a la tracción indirecta diametral en relación al concreto patrón. Asimismo, Novillo et al., (2017), encontraron que el 10% y 30% de caucho reciclado incorporado en el concreto supera a la resistencia a la tracción indirecta respecto al concreto patrón. Por su parte Rodríguez et al., (2019) encontraron que la resistencia a la tracción indirecta diametral con incorporación de 5% de caucho reciclado presenta el valor más alto 44.46 kgf/cm².

3.5. Análisis estadístico de la resistencia a la tracción indirecta diametral

Al realizar la investigación, se plantea dos hipótesis de investigación lo cual, la alterna muestra que, al agregar el caucho fino o granulado, la resistencia de la tracción indirecta diametral mejora significativamente y la hipótesis nula menciona que, por más que se agregue la cantidad de caucho fino o granulado la resistencia a la tracción indirecta diametral será siempre igual; al tener dichas hipótesis se ejecuta el análisis de resultados con la prueba Tukey de análisis de varianza.

3.5.1. Análisis estadístico de la resistencia a la tracción indirecta diametral con incorporación de caucho fino

Al procesar los 12 tratamientos en relación con el concreto patrón, presentamos el análisis de varianza cuyo valor P es de 0.005 menor a 0,05; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Según la tabla 15 se muestra un valor F calculado de 9.36 que es mayor al valor F crítico 4.07.

Tabla 15.
Análisis de varianza.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados ajustado	Cuadrados medios ajustado	Valor F	Valor p
Tratamiento	3	9.165	3.0552	9.36	0.005
Error	8	2.612	0.3265		
Total	11	11.777			

Fuente: Elaboración propia

Del análisis de la tabla 15 se deduce que la incorporación de 2% 4% y 6% de caucho fino mejora la resistencia a la tracción indirecta diametral en base al incremento de dicho agregado respecto al concreto patrón de 210 kgf/cm². Lo que afirma que hay diferencia entre las medias de los tratamientos de la investigación, así también por el método de Tukey mostramos la agrupación de medias en la tabla 16.

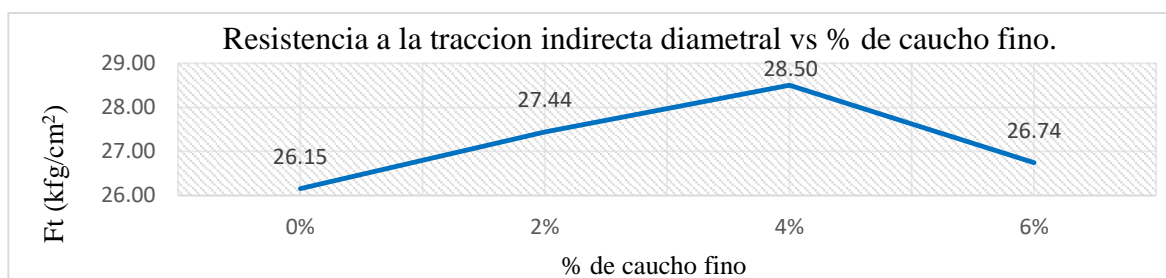
Tabla 16.

Grupos de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.

Tratamiento	N	Media	Agrupación	
C.- 4% C.F. (28 días)	3	28.50	A	
C.- 2% C.F. (28 días)	3	27.44	A	B
C.- 6% C.F. (28 días)	3	26.74	B	
CP-S/C (28 días)	3	26.15	B	

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 16, se observa que la resistencia más óptima es al 4% y 2% de caucho fino a los 28 días, cuyas medias se encuentra en la agrupación “A” con una resistencia a la compresión de 28.50 kgf/cm² y 27.44 kgf/cm² respectivamente. Para más detalle se muestra el comportamiento de las resistencias a la tracción indirecta diametral en los 28 días



de edad en la figura 7.

Figura 7: Resistencia a la tracción indirecta diametral vs % de caucho fino.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 17, se presenta las probabilidades estadísticas de máximos y mínimas resistencias que se podría llegar según las condiciones en el campo de trabajo; por consiguiente, muestra que la incorporación de caucho al 4% en 28 días es el más óptimo con una media de 28.50 kgf/cm², el cual tiene la posibilidad de llegar a una resistencia máxima de 29.26 kgf/cm², como también se puede quedar solo en 27.74 kgf/cm².

Tabla 17.*Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.*

Tratamiento	N	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza de 95%
C.- 2% C.F.	3	27.44	0.605	(26.68; 28.20)
C.- 4% C.F.	3	28.50	0.276	(27.74; 29.26)
C.- 6% C.F.	3	26.74	0.621	(25.98; 27.50)
CP-S/C	3	26.15	0.691	(25.39; 26.92)

Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Análisis estadístico de la resistencia a la tracción indirecta diametral con incorporación de caucho granulado

Al procesar los 12 tratamientos en relación con el concreto patrón, presentamos el análisis de varianza cuyo valor P es de 0.0000 menor a 0,05; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Así también en la tabla 18 se muestra un valor F calculado de 24.56 que es mayor al valor F crítico 4.066.

Tabla 18.*Análisis de varianza.*

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrado Ajustado	Medios cuadrados Ajustado	Valor F	Valor p
Tratamiento	3	26.816	8.9385	24.56	0.0000
Error	8	2.912	0.364		
Total	11	29.727			

Fuente: Elaboración propia

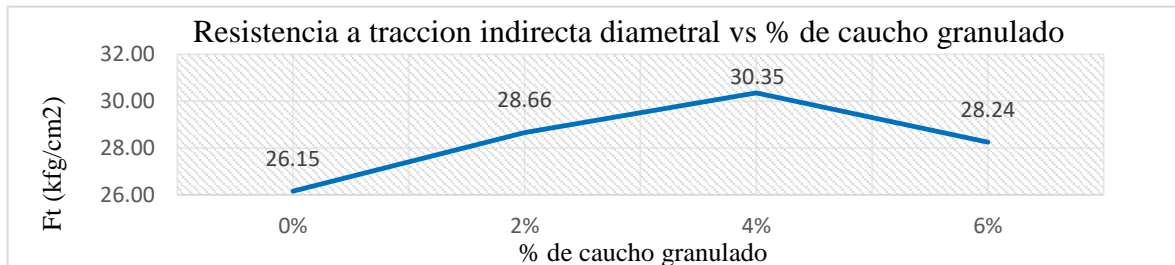
Las pruebas estadísticas mostradas en la tabla 18 determinan que la incorporación de 2% 4% y 6% de caucho granulado mejora la resistencia a la tracción indirecta diametral en base al incremento de dicho agregado respecto al concreto patrón 210 kgf/cm². Lo que afirma que diferencia entre las medias de los tratamientos de la investigación, así también por el método de Tukey se muestra la agrupación de medias en la tabla 19.

Tabla 19.*Grupos de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.*

Tratamiento	N	Media	Agrupación
C.- 4% C.G.	3	30.35	A
C.- 2% C.G.	3	28.66	B
C.- 6% C.G.	3	28.24	B
CP-S/C	3	26.15	C

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 19 se observa, que la resistencia a la tracción indirecta diametral más óptima es al 4% de caucho granulado en 28 días, cuya media se encuentra en la agrupación “A” el cual



muestra una resistencia a la tracción de 30.35 kgf/cm². Para más detalles se muestra el comportamiento de las resistencias a la tracción a los 28 días en la figura 8.

Fuente: Elaboración propia

Figura 8: Resistencia a la tracción indirecta diametral vs % de caucho Granulado.

En la tabla 20, se presenta las probabilidades estadísticas de máximos y mínimas resistencias que se podría llegar según las condiciones en el campo de trabajo; por consiguiente, muestra que la incorporación de caucho al 4% en 28 días es el más óptimo con una media de 30.35 kgf/cm², el cual tiene la posibilidad de llegar a una resistencia máxima de 31.16 kgf/cm², como también se puede quedar solo en 29.55 kgf/cm².

Tabla 20.

Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.

Tratamiento	N	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza de 95%
C.- 2% C.G.	3	28.66	0.606	(27.86; 29.46)
C.- 4% C.G.	3	30.35	0.624	(29.55; 31.16)
C.- 6% C.G.	3	28.24	0.47	(27.44; 29.04)
CP-S/C	3	26.15	0.691	(25.35; 26.96)

Fuente: Elaboración propia

3.6. Módulo de elasticidad estático

Según Serrano y Pérez , (2010) este módulo describe la rigidez relativa de un material, el cual es un parámetro relacionado con la resistencia a compresión del mismo. De este modo se consideró determinar el módulo de elasticidad estática con la fórmula 8.3 del R.N.E E.060

el cual está en función de la resistencia a compresión alcanzada, en la figura 9 se muestra el resumen de los resultados obtenidos del módulo de elasticidad estático.

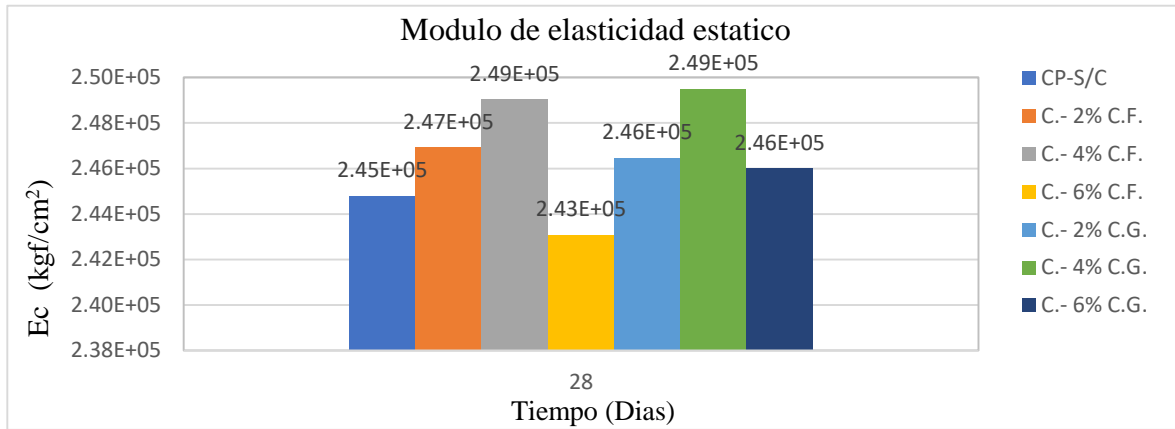


Figura 9: Resultados del ensayo módulo de elasticidad estático

Fuente: Elaboración propia

En la figura 9 se observa que el módulo de elasticidad estática con incorporación de 2% y 4% de caucho reciclado tanto fino como granulado poseen los mayores valores respecto al concreto patrón, así también lo confirman Verzegnassi et al., (2011) quienes encontraron un incremento del módulo de elasticidad con la incorporación de 1% de caucho reciclado en el concreto. Por su parte Safan et al., (2017) encontraron un incremento del módulo de elasticidad con incorporación de caucho reciclado tratado con hidróxido de sodio.

3.7. Análisis estadístico del módulo de elasticidad estático

Al realizar la investigación, se plantea dos hipótesis de investigación lo cual, la alterna muestra que, al agregar el caucho fino o granulado, el módulo de elasticidad estático mejora significativamente y la hipótesis nula menciona que, por más que se agregue la cantidad de caucho fino o granulado el módulo de elasticidad estático será siempre igual; al tener dichas hipótesis se ejecuta el análisis de resultados con la prueba Tukey de análisis de varianza.

3.7.1. Análisis estadístico del módulo de elasticidad estático con incorporación de caucho fino.

Al procesar los 12 tratamientos en relación con el concreto patrón, presentamos el análisis de varianza cuyo valor P es de 0.008 menor a 0,05; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula

y se acepta la hipótesis alterna. Según la tabla 21 se muestra un valor F calculado de 8.07 que es mayor al valor F crítico 4.066.

Tabla 21.
Análisis de varianza.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados ajustado	Medios cuadrados ajustado	Valor F	Valor p
Tratamiento	3	6.00E+07	2.00E+07	8.07	0.008
Error	8	1.98E+07	2.48E+06		
Total	11	7.99E+07			

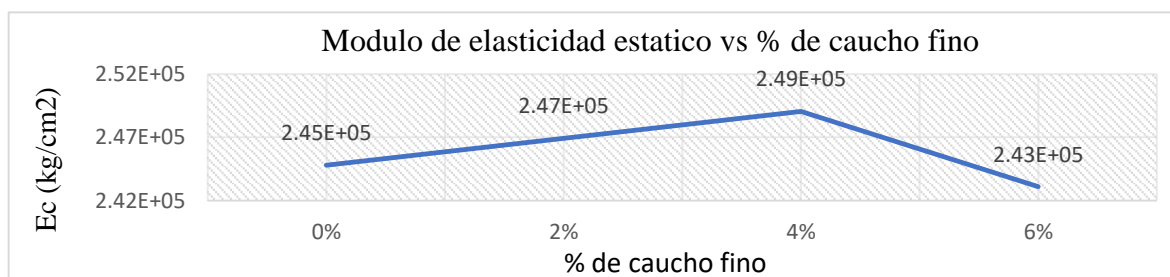
Fuente: Elaboración propia

Las pruebas estadísticas mostradas en la tabla 21 determinan que la incorporación de 2% 4% y 6% de caucho fino aumenta el módulo de elasticidad estático en base al incremento de dicho agregado respecto al concreto patrón de 210 kgf/cm². Lo que afirma que hay diferencia entre las medias de los tratamientos de la investigación. Así también por el método de Tukey mostramos la agrupación de medias en la tabla 22.

Tabla 22.
Grupos de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.

Tratamiento	N	Media	Agrupación
C.- 4% C.F.	3	2.49E+05	A
C.- 2% C.F.	3	2.47E+05	A B
CP-S/C	3	2.45E+05	B
C.- 6% C.F.	3	2.43E+05	B

Fuente: Elaboración propia



De la tabla 22 se observa que el módulo de elasticidad estático más óptima es al 4% y 2% de caucho fino en 28 días, cuyas medias se encuentra en la agrupación “A” con un módulo de elasticidad estático de 2.49E+05 kgf/cm² y 2.47E+05 kgf/cm² respectivamente. Para más detalles se muestra el comportamiento del módulo de elasticidad estático a los 28 días en la figura 10.

Figura 10: Modulo de elasticidad estático vs % de caucho fino.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 23, se presenta las probabilidades estadísticas de máximos y mínimas del valor del módulo de elasticidad estático que se podría llegar según las condiciones en el campo de trabajo; por consiguiente, muestra que la incorporación de caucho al 4% en 28 días es el más óptimo con una media de $2.49E+05$ kgf/cm², el cual tiene la posibilidad de llegar a un módulo de elasticidad estático de $2.51E+05$ kgf/cm², como también se puede quedar solo en $2.47E+05$ kgf/cm².

Tabla 23.
Probabilidades estadísticas de máximos y mínimas.

Tratamiento	N	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza de 95%
C.- 2% C.F.	3	2.47E+05	1581	(2.45E+05; 2.49E+05)
C.- 4% C.F.	3	2.49E+05	1379	(2.47E+05; 2.51E+05)
C.- 6% C.F.	3	2.43E+05	2289	(2.41E+05; 2.45E+05)
CP-S/C	3	2.45E+05	531	(2.43E+05; 2.47E+05)

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Análisis estadístico del módulo de elasticidad estático con incorporación de caucho granulado.

Al procesar los 12 tratamientos en relación con el concreto patrón, presentamos el análisis de varianza cuyo valor P es de 0.032 menor a 0,05; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. Según la tabla 25 se muestra un valor F calculado de 4.88 que es mayor al valor F crítico 4.066.

Tabla 24.
Análisis de varianza.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados ajustado	Medios cuadrados ajustado	Valor F	Valor p
Tratamiento	3	3.59E+07	1.20E+07	4.88	0.032
Error	8	1.95E+07	2.45E+06		
Total	11	5.54E+07			

Fuente: Elaboración propia

Las pruebas estadísticas mostradas en la tabla 24 determinan que la incorporación de 2% 4% y 6% de caucho granulado mejora el valor del módulo de elasticidad en base al incremento de dicho agregado respecto al concreto patrón de 210 kgf/cm². Lo que afirma que hay diferencia entre las medias de los tratamientos de la investigación. Así mismo por el método de Tukey mostramos la agrupación de medias en la tabla 25.

Tabla 25.

Grupos de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.

Tratamiento	N	Media	Agrupación	
C.- 4% C.G.	3	2.49E+05	A	
C.- 2% C.G.	3	2.46E+05	A	B
C.- 6% C.G.	3	2.46E+05	A	B
CP-S/C	3	2.45E+05		B

Fuente: Elaboración propia

De la tabla 25 se observa que el módulo de elasticidad estático más óptima es al 4%, 2% y 6% de caucho granulado en 28 días, cuyas medias se encuentran en la agrupación “A” con un módulo de elasticidad de 2.49E+05 kgf/cm² y 2.46E+05 kgf/cm² respectivamente. Para más detalles se muestra el comportamiento del módulo de elasticidad estático a los 28 días en la figura 11.

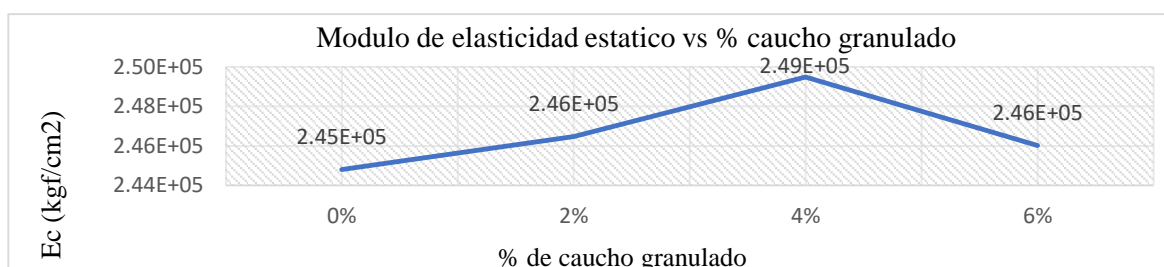


Figura 11: Modulo de elasticidad estático vs % de caucho granulado.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 26, se presentan las probabilidades estadísticas de máximos y mínimos del valor del módulo de elasticidad estático que se podría llegar según las condiciones en el campo de trabajo; por consiguiente, muestra que la incorporación de caucho granulado al 4% en 28 días es el más óptimo con una media de 2.49E+05 kgf/cm², el cual tiene la posibilidad de llegar a un módulo de elasticidad estático de 2.52E+05 kgf/cm², como también se puede quedar solo en 2.47E+05 kgf/cm².

Tabla 26.

Probabilidades estadísticas de máximos y mínimos

Tratamiento	N	Media	Desviación estándar	Intervalo de confianza de 95%
C.- 2% C.G.	3	2.46E+05	1578	(2.44E+05; 2.49E+05)
C.- 4% C.G.	3	2.49E+05	2127	(2.47E+05; 2.52E+05)
C.- 6% C.G.	3	2.46E+05	1581	(2.44E+05; 2.48E+05)
CP-S/C	3	2.45E+05	531	(2.43E+05; 2.47E+05)

Fuente: Elaboración propia

3.8. Análisis de la respuesta sísmica hipotética de la edificación con los resultados óptimos.

En la tabla 27 se muestra el resumen de resultados óptimos obtenidos del concreto con incorporación con caucho reciclado respecto al concreto patrón, en el cual se observa que el valor del módulo de elasticidad no vario significativamente, pero se tuvo una reducción del peso específico y una mejora de la resistencia a la compresión de las muestras.

Tabla 27.

Resumen de resultados óptimos obtenidos.

Tipos de concreto	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Peso específico (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)
C.P- S/C	266	2376	2.45E+05
C.- 2% de C.F.	271	2365	2.47E+05
C.- 4% de C.F.	276	2327	2.49E+05
C.- 2% de C.G.	270	2362	2.46E+05
C.- 4% de C.G.	277	2316	2.49E+05

Fuente: Elaboración propia

En la figura 12 y 13 se muestran los resultados de las edificaciones evaluadas con los datos de la tabla 27 del cual se deduce que la incorporación de caucho granulado y fino al 2% y 4% mejora positivamente las características elásticas de la edificación respecto a la edificación evaluada con el concreto patrón. Así mismo mostraron una reducción de los desplazamientos de entrepisos, debido a que su módulo de elasticidad estático no vario significativamente, pero si se tuvo una reducción del peso específico lo cual hizo que la estructura tenga un comportamiento más dúctil y elástico frente a las solicitaciones sísmicas.

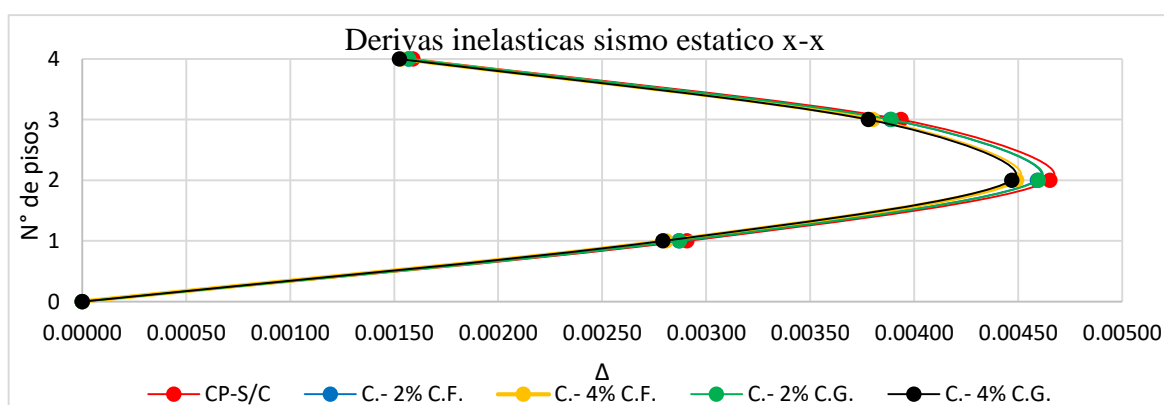


Figura 12: Derivas inelásticas sismo x-x con incorporación de caucho reciclado.

Fuente: Elaboración propia

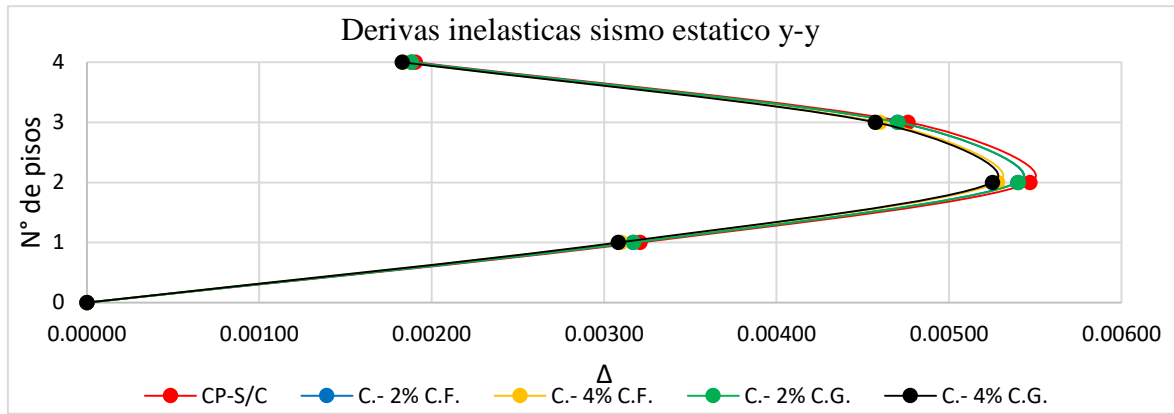


Figura 13: Derivas inelásticas sismo y-y con incorporación de caucho reciclado.

Fuente: Elaboración propia

Como se visualizó anteriormente el peso específico del concreto influye notoriamente en el comportamiento sísmico de las estructuras, en la figura 14 se muestra la alteración del peso de la edificación analizada con los óptimos porcentajes de caucho encontrados, por lo cual el peso de la edificación se redujo conforme se fue incrementando caucho reciclado, gracias a que el caucho tiene la propiedad de ser más liviano que los agregados.

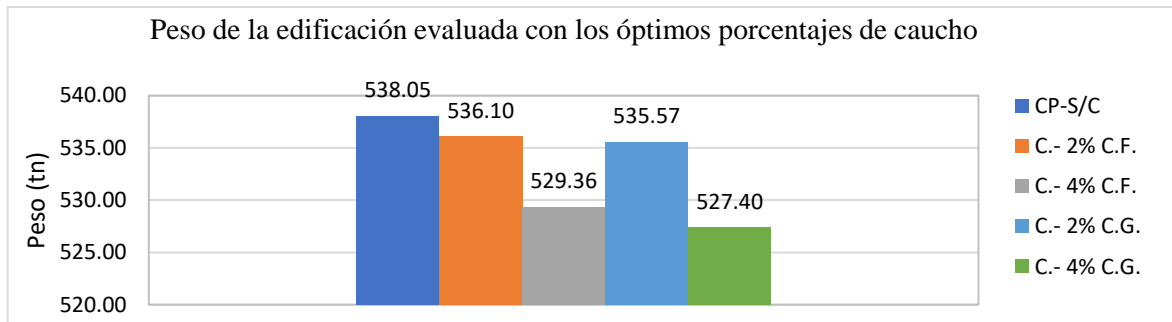


Figura 14: Peso de la edificación evaluada con los óptimos porcentajes de caucho.

Fuente: Elaboración propia

3.9. Porcentaje de mejora de la respuesta sísmica hipotética de la edificación con los óptimos resultados.

En la tabla 28 se muestra las derivas máximas para el sismo X-X de la edificación evaluada con los porcentajes óptimos de caucho, así también el porcentaje de mejora de la respuesta sísmica respecto a la edificación evaluada con el concreto patrón. Por lo que se observa que el caucho tanto fino como granulado al 4 % posee el mayor porcentaje de mejora con 3.44% y 3.87% respectivamente.

Tabla 28.*Derivas máximas (Sismo X-X) y % de mejora.*

Estructura	Deriva máxima x-x	%	% de mejora
Concreto Patrón	0.00465	100	0.00
C. E. con 2% de C.F.	0.00459	101.29	1.29
C. E. con 4% de C.F.	0.00449	103.44	3.44
C. E. con 2% de C.G.	0.00460	101.08	1.08
C. E. con 4% de C.G.	0.00447	103.87	3.87

Fuente: Elaboración propia

Así también en la tabla 29 se muestra las derivas máximas para el sismo Y-Y de la edificación evaluada con los porcentajes óptimos de caucho, así mismo el porcentaje de mejora de la respuesta sísmica respecto a la edificación evaluada con el concreto patrón. Por lo que se observa que el caucho tanto fino como granulado al 4 % posee el mayor porcentaje de mejora con 3.47% y 3.96% respectivamente.

Tabla 29.*Derivas máximas (Sismo y-y) y % de mejora.*

Estructura	Deriva máxima y-y	%	% de mejora
Concreto Patrón	0.00547	100.00	0.00
C. E. con 2% de C.F.	0.00540	101.28	1.28
C. E. con 4% de C.F.	0.00528	103.47	3.47
C. E. con 2% de C.G.	0.00540	101.28	1.28
C. E. con 4% de C.G.	0.00525	103.96	3.96

Fuente: Elaboración propia

4. CONCLUSIONES

La incorporación de caucho reciclado tanto fino como granulado al 4% evidencia una mejora de algunas propiedades mecánicas del concreto, y ello también se observa en el análisis de la respuesta sísmica hipotética de la edificación, el cual mostró un comportamiento elástico aceptable, por lo cual se verifica que influye positivamente el caucho reciclado en el concreto estructural y por tanto se sugiere la utilización de este porcentaje de caucho en el concreto. Por otra parte, se observó una disminución de las propiedades con la incorporación de caucho tanto granulado como fino al 6%.

En relación a los ensayos completados a los agregados del concreto para la obtención de la mezcla patrón de acuerdo con la ASTM, los cuales muestran que los agregados están dentro de los parámetros y límites establecidos por la norma ya nombrada, teniéndose así agregados aptos para realizar los diseños de mezcla planteados en la investigación.

La resistencia a la compresión con la incorporación de caucho tanto fino como granulado al 4% superó la resistencia a la compresión en un 3.76% (276 kgf/cm²) y 4.14% (277 kgf/cm²) respecto al concreto patrón (266 kgf/cm²), siendo este el más óptimo, por otro lado, la incorporación al 6% de caucho tanto fino como granulado presenta ya una disminución de su resistencia 262 kgf/cm² y 269 kgf/cm², es decir que a mayor cantidad de caucho la resistencia a la compresión disminuye.

Del ensayo de la resistencia a la tracción indirecta diametral, para el concreto con incorporación de caucho al 4% tanto fino como granulado aumenta en un 8.98% (28.50 kgf/cm²) y 16.05% (30.35 kgf/cm²) respecto al concreto patrón (26.15 kgf/cm²), lo cual evidencia que los especímenes con caucho detallan una alta aptitud para absorber energía plástica, por tanto, el caucho tiene la capacidad de soportar grandes deformaciones elásticas antes de la falla.

El módulo de elasticidad estático no varía mayormente para el concreto con incorporación de 4% tanto fino como granulado, pero si se observa una disminución para el concreto con incorporación de caucho al 6% tanto fino como granulado, es decir que, a mayor porcentaje de caucho, el módulo de elasticidad tiende a bajar respecto al concreto patrón, de esta manera

se evidencia que el caucho tiene la simplicidad para deformarse en presencia de cargas de compresión.

Del análisis de la respuesta sísmica hipotética de la edificación evaluada con los óptimos resultados se llegó a la conclusión de que el concreto con incorporación de caucho reciclado al 4% tanto fino como granulado mejoró las características elásticas de la edificación respecto al concreto patrón, además que sus desplazamientos se redujeron, con una resistencia a la compresión superior, manteniendo un módulo de elasticidad estático semejante al del concreto patrón y paralelamente se redujo el peso de la estructura debido al menor peso específico del concreto con caucho reciclado.

De acuerdo con análisis de la respuesta sísmica hipotética de la edificación evaluada con los óptimos resultados, se determinó un porcentaje de mejora con la incorporación de caucho al 4% de las derivas máximas en el sentido X del 3.44% para el concreto con caucho fino y del 3.87% para el concreto con caucho granulado, así mismo para el sentido Y del 3.47% para el concreto con caucho fino y 3.96% para el concreto con caucho granulado respecto al concreto patrón. Demostrando así que es aceptable el uso de caucho al 4% tanto fino como granulado en el concreto.

5. REFERENCIAS

- Amat Rodrigo, J. (2016). ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias. https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova
- Carrasco Díaz, Sergio. (2008). Metodología de la investigación científica: pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación. https://books.google.com/books/about/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_cient.html?hl=es&id=pgThrQEACAAJ
- E.060. (2009). Norma Técnica E.060 “Concreto Armado” del reglamento nacional de edificaciones. Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento.
- Farfán, M., & Leonardo, E. (2018). Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(3), 241–250. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000300241>
- García Villalpando, J. A., Castillo Morales, A., Ramírez Guzmán, M. E., Rendón Sánchez, G., & Larqué Saavedra, M. U. (2001). Comparación de los procedimientos de tukey, duncan, dunnett, hsu y bechhofer para selección de medias. *Redalyc*, 35, 79–86. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30235107>
- Gibreil, H. A. A., & Feng, C. P. (2017). Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 142, 101–108. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.062>
- Guo, Y. C., Zhang, J. H., Chen, G. M., & Xie, Z. H. (2014). Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 72, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.036>
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. Edamsa Impresiones, S.A. http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/SampieriLasRutas.pdf
- Ghosh, S., & Bera, D. K. (2016). Fundamental properties of self-compacting concrete utilizing waste rubber tires-a review. *ijret: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2321–7308. Retrieved June 27, 2022, from <http://www.ijret.org>
- Kara De Maeijer, P., Craeye, B., Blom, J., & Bervoets, L. (2021). Crumb rubber in concrete—the barriers for application in the construction industry. *Infrastructures*, 6(8),

- 1–20. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6080116>
- Ministerio de Vivivenda Construcccion, & Saneamiento. (2018). Reglamento Nacional de Edificaciones E.030 Diseño Sismorresistente. Diario El Peruano, 576293–576322. <https://busquedas.elperuano.pe/download/url/anexo-de-rm-n-355-2018-vivienda-mediante-la-cual-se-modi-anexo-rm-n355-2018-vivienda-1720685-1>
- Novillo, G., Jose, M., Bacuilima, I., Fernando, D., Novillo, M., & Andres, F. (2017). Elaboración de hormigones con caucho reciclado. <http://www.amica.com.mx/issn/Tabasco/AMI-143.pdf>
- Pasquel Carbajal, E. (1998). tópicos de tecnología de concreto en el Perú (Segunda). <https://issuu.com/jj1989/docs/145311372-topicos-de-tecnologia-de>
- Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T. A., & Bernardin, A. M. (2011). Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 757–763. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.014>
- Pnevmatikos, N., Konstandakopoulou, F., & Koumoutsos, N. (2020). Seismic vulnerability assessment and loss estimation in Cephalonia and Ithaca islands, Greece, due to earthquake events: A case study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136, 106252. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2020.106252>
- Rodríguez R., S. L., Hernández H., L. S., Pérez Gutiérrez, F. G., & Díaz A., J. H. (2019). Mechanical behavior of reinforced concrete with waste-tire particles under an indirect tensile test. *MRS Advances*, 4(54), 2931–2937. <https://doi.org/10.1557/ADV.2019.462>
- Safan, M., Fatma M, E., & Awad, M. (2017). Enhanced Properties of Crumb Rubber and Its Application in Rubberized Concrete. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 7(5), 1784-1790. <http://inpressco.com/category/ijcet>
- Serrano Guzmán, M. F., & Pérez Ruiz, D. D. (2011). Concreto preparado con residuos industriales: resultado de alianza empresa universidad. *Revista Educación En Ingeniería*, 6(11), 1–11. <https://doi.org/10.26507/REI.V6N11.116>
- Vargas Neumann, J. (2016). Normas de Tierra: Ensayos de Tracción Indirecta. https://craterre.hypotheses.org/files/2018/05/TERRA-2016_Th-4_Art-133_Vargas-Neumann.pdf
- Verzegnassi, E., Cecche Lintz, R. C., Gachet Barbosa, L. A., & P.G. de Avila Jacintho, A. E. (2011). Concreto convencional com adição de borracharecyclada de pneus: estudo das propriedades. *Estudos Tecnológicos Em Engenharia*, 7(2), 98–108.

<https://doi.org/10.4013/ETE.2011.72.03>

Youssf, O., ElGawady, M. A., & Mills, J. E. (2015). Experimental Investigation of Crumb Rubber Concrete Columns under Seismic Loading. *Structures*, 3, 13–27.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.02.005>