

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**



**“DESEMPEÑO DE UN CONCRETO ADICIONADO CON
METACAOLÍN Y CAUCHO PARA SU APLICACIÓN EN
ANDADORES”**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA

ING. GUARDADO GASTELUM ANA LAURA

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. ROGER ULISSES HERNÁNDEZ ZAMORA

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. MIGUEL ARMANDO AVILA RUBIO

CULIACÁN, SINALOA, 22 DE NOVIEMBRE DE 2023.



Dirección General de Bibliotecas



U n i v e r s i d a d A u t ó n o m a d e S i n a l o a

REPOSITORIO INSTITUCIONAL

UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.



Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa a la realización de esta tesis. Sus valiosas contribuciones y apoyo han sido fundamentales para llevar a cabo este proyecto.

Quiero agradecer a mi director de tesis, M.C. Roger Ulisses Hernández Zamora, por su orientación constante, paciencia y sabios consejos a lo largo de todo el proceso de investigación. Su experiencia y dedicación fueron una fuente inestimable de inspiración.

A mi coordirector, Dr. Miguel Armando Avila Rubio, por sus valiosos comentarios y sugerencias que hicieron de esta tesis un mejor trabajo, le reconozco y agradezco todas las enseñanzas que recibí con base en su experiencia.

A mis padres, a mis hermanos y a mi apoyo incondicional, les agradezco su comprensión y paciencia durante las largas horas de estudio y trabajo. Su amor y aliento fueron mi principal motivación en tiempos de frustración.

A la Facultad de Ingeniería Culiacán de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), donde se realizó la parte experimental de esta tesis. En especial al Ing. Jose Luis Ureña Flores, por su apoyo solidario desde un inicio, recordandolo con la frase “el mejor maestro es aquel que enseña sin esperar recompensa”.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para cursar la Maestría en Ingeniería de la Construcción, sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

A todas aquellas personas familiares, amigos, compañeros, maestros y doctores que contribuyeron directa o indirectamente para la realización de esta tesis con comentarios, crítica y aportes los cuales fueron tomados en cuenta y ayudaron a la progresión de este trabajo muchas gracias.

RESUMEN

Uno de los retos que la sociedad actual afronta, se relaciona con la gestión y eliminación adecuada de los desechos sólidos, como es el caso de los neumáticos. El caucho, que constituye el material principal en la fabricación de los neumáticos, proviene de fuentes tanto naturales como sintéticas, y se mezcla con componentes como azufre, carbón, antioxidantes y otros elementos que complican su proceso de reutilización.

En el presente estudio se reporta el comportamiento de un concreto donde se utilizó caucho como remplazo parcial de la arena y se adicionó metacaolín (MK, por sus siglas en inglés) por cemento, con el objetivo de una aplicación en andadores con base a una resistencia de diseño de 200 kg/cm^2 , lo cual puede ser una alternativa viable en prácticas de construcción sostenible. Se realizaron distintos especímenes con mezclas de mortero, se mantuvo un 15% de MK y se varió el porcentaje de caucho (7, 8.5 y 10%). En otras mezclas se mantuvo fijo un 7% de caucho y se varió el porcentaje de MK de 17 y 20%. Lo anterior con el fin de conocer el impacto en la resistencia con respecto a la variación de porcentajes de ambas variables y así poder seleccionar el porcentaje de reemplazo que tenga mejor efecto en la mezcla. A todas las mezclas se les realizó pruebas en estado fresco, como fluidez y masa volumétrica. Respecto a pruebas mecánicas, los ensayos a compresión mostraron una mejor resistencia a 14 días con la mezcla de 15% MK y 7% caucho.

Finalmente, se efectuó una mezcla de concreto con reemplazo de 15% MK y 7% de caucho, a la cual se le realizó pruebas mecánicas como resistencia a la compresión, flexión y módulo elástico a 7 y 28 días; también se realizaron pruebas en estado fresco como revenimiento y masa volumétrica. Se obtuvieron resistencias a la compresión de 195 kg/cm^2 , lo cual se adapta para el uso propuesto en este trabajo. Palabras clave: caucho, metacaolín, concreto, mortero.

ABSTRACT

One of the challenges that today's society faces is related to the proper management and disposal of solid waste, such as in the case of tires. Rubber, which constitutes the main material in tire manufacturing, comes from both natural and synthetic sources and is mixed with components like sulfur, carbon, antioxidants, and other elements that complicate its reuse process.

In the present study, the behavior of a concrete mixture is reported, where rubber was used as a partial replacement for sand, and metakaolin (MK, for its acronym in English) was added to Portland cement. The objective was to achieve an application in walkways with a target design strength of 200 kg/cm², which could be a viable alternative in sustainable construction practices. Various mortar specimens were prepared, maintaining a 15% content of MK, and the rubber content was varied (7, 8.5, and 10%). In other mixtures, a fixed 7% rubber content was maintained, and the MK percentage was varied from 17 to 20%. This was done to assess the impact on strength concerning the variation of percentages of both variables, in order to select the replacement percentage that has the best effect on the mixture. All mixtures were subjected to tests in their fresh state, including flowability and volumetric mass. Regarding mechanical tests, compression tests showed better strength at 14 days with the mixture containing 15% MK and 7% rubber.

Finally, a concrete mixture with a replacement of 15% MK and 7% rubber was tested for mechanical properties, including compression strength, flexural strength, and elastic modulus at 7 and 28 days. Fresh state tests, such as slump and volumetric mass, were also conducted. Compression strengths of 195 kg/cm² were obtained, which are suitable for the intended use in this study. Keywords: rubber, metakaolin, concrete, mortar.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Generalidades	15
1.2 Planteamiento del problema	18
1.3 Objetivos.....	21
1.3.1 Objetivo general.....	21
1.3.2 Objetivos específicos	21
1.4 Hipótesis.....	21
1.5 Justificación	22
2. MARCO TEÓRICO	25
2.1 Marco conceptual.....	25
2.1.1 Cemento	25
2.1.2 Agregados	26
2.1.3 Grano de caucho reciclado.....	27
2.1.4 Materiales cementantes suplementarios.....	28
2.1.4.1 Puzolana natural.....	28
2.1.4.2 Metacaolín	29
2.1.4.3 Efecto puzolánico del metacaolín con el cemento.....	29
2.1.5 Mortero	30
2.1.6 Propiedades del mortero.....	31
2.1.6.1 Trabajabilidad	31
2.1.6.2 Consistencia.....	31
2.1.7 Concreto	32
2.1.8 Dosificación de mezclas de concreto	32
2.1.9 Propiedades del concreto en estado fresco.....	33

2.1.9.1	Revenimiento.....	33
2.1.9.2	Masa volumétrica	33
2.1.10	Propiedades del concreto endurecido	34
2.1.10.1	Resistencia a la compresión.....	34
2.1.10.2	Resistencia a la flexión	34
2.1.10.3	Módulo de elasticidad.....	35
2.2	Estado del arte	35
3.	METODOLOGÍA	41
3.1	Descripción de los materiales.....	41
3.1.1	Cemento	41
3.1.2	Agregados	42
3.1.3	Grano de caucho reciclado.....	42
3.1.4	Metacaolín	43
3.2	Ensayos realizados para la caracterización de materiales	43
3.2.1	Determinación de la granulometría de los agregados.....	43
3.2.2	Determinación de la masa volumétrica de los agregados	45
3.2.3	Determinación de la densidad de los agregados.....	46
3.2.3.1	Determinación de la densidad de la arena	46
3.2.3.2	Determinación de la densidad de la grava.....	48
3.2.4	Determinación de la densidad del caucho	49
3.2.5	Determinación de la densidad del cemento y metacaolín.....	50
3.2.6	Determinación de la absorción del agregado	51
3.3	Elaboración de mortero con caucho y metacaolín	51
3.3.1	Elaboración de mezcla de mortero.....	52
3.3.2	Prueba de fluidez al mortero.....	52

3.3.3	Fabricación y curado de cubos de mortero de 5x5x5 cm	53
3.4	Elaboración de concreto con caucho y metacaolín.....	54
3.4.1	Elaboración de mezcla de concreto	54
3.4.2	Prueba de revenimiento al concreto	54
3.4.3	Masa volumétrica del concreto.....	55
3.4.4	Elaboración de especímenes de concreto para ensaye	55
3.5	Pruebas mecánicas en laboratorio.....	56
3.5.1	Determinación de la resistencia a compresión del concreto.....	56
3.5.2	Ensaye a flexión en vigas de concreto	56
3.5.3	Módulo de elasticidad en cilindros de concreto	57
3.5.4	Prueba de impacto a concreto.....	57
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
4.1	Ensayos físicos realizados a los materiales.....	58
4.1.1	Análisis granulométrico a agregados	58
4.1.2	Densidad de los materiales.....	61
4.1.3	Masa volumétrica de los agregados	65
4.1.4	Absorción de los agregados.....	67
4.2	Mortero con caucho y metacaolín	68
4.2.1	Diseño de mezcla de morteros	68
4.2.2.	Fluidez en las mezclas de mortero.....	71
4.2.3.	Masa volumétrica de los morteros	72
4.2.4.	Ensaye a la compresión de los morteros	73
4.3.	Concreto con caucho y metacaolín.....	77
4.3.1.	Diseño de mezcla de concreto.....	77
4.3.2.	Prueba de revenimiento en mezclas de concreto	78

4.3.3. Masa volumétrica en mezclas de concreto	79
4.3.4. Ensaye a la compresión de los concretos.....	81
4.3.5. Ensaye a la flexión de los concretos	82
4.3.6. Módulo de elasticidad de los concretos	85
4.3.7. Prueba de impacto en los concretos.	89
4.4. Esquema del comportamiento ante esfuerzos del caucho.	92
4.5. Diseño para pavimento de andadores	95
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
6. REFERENCIAS.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del MK.	29
Tabla 2. Propiedades del Cemento CEMEX CPC 30R extra.	42
Tabla 3. Propiedades físicas del MK marca “metaforce”.	43
Tabla 4. Juego de mallas para gravas y arenas.	44
Tabla 5. Porcentajes de remplazo de MK y caucho en mezclas de mortero.	52
Tabla 6. Límites de granulometría para agregado grueso.	58
Tabla 7. Resultados del análisis granulométrico de agregado grueso.	58
Tabla 8. Límites de granulometría para agregado fino.	59
Tabla 9. Resultados del análisis granulométrico de agregado fino.	60
Tabla 10. Densidad de la arena.	62
Tabla 11. Densidad de la grava.	62
Tabla 12. Densidad del caucho.	63
Tabla 13. Densidad del cemento.	63
Tabla 14. Densidad del MK.	64
Tabla 15 Masa volumétrica suelta y compacta de la arena.	65
Tabla 16. Masa volumétrica suelta y compacta de la grava.	66
Tabla 17. Absorción de la arena.	67
Tabla 18. Absorción de la grava.	68
Tabla 19. Cantidad de material para 6 cubos de mortero.	69
Tabla 20. Cantidades de material por muestra de mortero.	70
Tabla 21. Porcentajes de fluidez en mezclas de mortero.	71
Tabla 22. Masa volumétrica de los morteros.	73
Tabla 23. Cantidades de materiales utilizados en mezclas.	77
Tabla 24. Cantidades de materiales para 1 m ³	78
Tabla 25. Revenimiento de las mezclas de concreto.	78
Tabla 26. Masas volumétricas de las mezclas de concreto.	79
Tabla 27. Resultados de la prueba de módulo elástico al concreto.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Agregado fino y agregado grueso.	27
Figura 2. Caucho triturado.	27
Figura 3. Mortero con fluidez de 115%.	32
Figura 4. Mezcla de concreto.	33
Figura 5. Procedimiento del proyecto.	41
Figura 6. Aparato e instrumentos para realizar el ensayo de granulometría a arenas y gravas.	44
Figura 7. Equipo utilizado para el ensayo de masa volumétrica en agregados.	45
Figura 8. Equipo de matraz, pisón y cono para la prueba de densidad en agregados finos.	46
Figura 9. Prueba del cono para confirmar que la arena se encontraba en estado SSS.	47
Figura 10. Matraz con agregado fino y agua para ensayo de densidad en arenas.	47
Figura 11. Grava saturada en agua, secado de grava para su estado SSS, balanza para prueba de densidad a gravas.	48
Figura 12. Prueba para conocer densidad del caucho.	49
Figura 13 Prueba de densidad a MK y cemento	50
Figura 14. Mesa de fluidez.	53
Figura 15. Moldes para cubos de mortero de 5x5x5 cm.	53
Figura 16. Equipo para prueba de revenimiento.	55
Figura 17. Moldes para cilindros de 15X30 cm.	56
Figura 18. Curva granulométrica para el agregado grueso.	59
Figura 19. Curva granulométrica para el agregado fino.	60
Figura 20. Procedimiento de la masa volumétrica suelta y compacta.	67
Figura 21. Proceso de mezclado para mortero.	71
Figura 22. Proceso de la prueba de fluidez.	72
Figura 23. Comparación de esfuerzos a 28 días en morteros con distintos porcentajes de sustitución de MK y caucho.	74

Figura 24. Incrementos de esfuerzos a 7,14, 28 días en morteros con distintos porcentajes de sustitución de MK y caucho.	74
Figura 25. Muestras de mortero con caucho y MK después del ensayo a compresión.	76
Figura 26. Proceso de mezcla de concreto.	78
Figura 27. Procedimiento para prueba de revenimiento al concreto.	79
Figura 28. Prueba de masa volumétrica en concreto.	80
Figura 29. Comparación de esfuerzos a compresión a 7 y 28 días en muestras de concreto.....	81
Figura 30. Prueba de resistencia a la compresión en cilindro de concreto.	82
Figura 31. Esfuerzos a flexión a 28 días en muestras de concreto.	83
Figura 32. Ensayo a flexión de vigas de concreto ordinario.	83
Figura 33. Fractura en viga de concreto con MK y caucho tras ensayo a flexión..	84
Figura 34. Curva de deformación-esfuerzo a 7 días para mezclas de concreto....	85
Figura 35. Curva de deformación-esfuerzo a 7 días para mezclas de concreto adicionado con MK y caucho.....	86
Figura 36. Curva de deformación-esfuerzo a 28 días para mezclas de concreto..	87
Figura 37. Curva de deformación-esfuerzo a 28 días para mezclas de concreto adicionado con MK y caucho.....	87
Figura 38. Prueba de módulo elástico en cilindro de concreto.	89
Figura 39. Prueba de impacto en concreto ordinario.....	90
Figura 40. Prueba de impacto en concreto adicionado con MK y caucho.	90
Figura 41. Comparación de daños por impacto en concreto ordinario y concreto adicionado con MK y caucho.....	91
Figura 42. Esfuerzos normales de compresión y tensión que actúan en una viga al ser sometida a flexión (Bekaert 2020).....	92
Figura 43. Diagrama de esfuerzo del caucho dentro de la viga (Bekaert 2020)....	92
Figura 44. Cilindro de concreto sometido a compresión (Juárez 2020).	93
Figura 45. Esfuerzos principales y cortante máximo (Juárez 2020).	93
Figura 46. Interpretación esfuerzos del caucho a compresión (Juárez 2020).	94
Figura 47. Esquema de franjas en andadores (SEDUVI 2019).	95

Figura 48. Detalle de juntas y altura en cambio de nivel vertical (SEDUVI 2019).	96
Figura 49. Separación de rejillas (SEDUVI 2019).	96
Figura 50. Detalles de pavimento para andador colado en sitio (SEDUVI 2019). .	97

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La industria de la construcción es una de las áreas que brinda mayor aportación económica al país. Ya que a través de las nuevas tecnologías aplicadas por la ingeniería hay una mejora constante, la cual resuelve necesidades que inquietan a nuestro territorio. La construcción se caracteriza por un crecimiento constante debido a la necesidad demográfica de infraestructura habitable y a la modernización de las ciudades. En este sentido, se vuelve cada vez más crucial emplear materiales de construcción amigables con el medio ambiente que no dañen los ecosistemas, y que la elección adecuada de las materias primas empleadas en su producción guarde una relación directa con la calidad del concreto. Los progresos en la tecnología del concreto están impulsando la exploración de opciones de materiales alternativos que puedan mejorar las características del concreto y al mismo tiempo ayudar a mitigar la contaminación ambiental (Muñoz Pérez et al. 2021).

Es conocido que los agregados naturales del concreto provienen principalmente de la grava y la arena triturada. Por lo tanto, la continua explotación de los recursos naturales por parte de las personas para la obtención de estos materiales, están generando una grave amenaza ecológica. En consecuencia, existe una necesidad urgente de explorar nuevos materiales alternativos que puedan cumplir con los estándares de sostenibilidad requeridos por la industria de la construcción en la elaboración del concreto (Ma et al. 2023).

Entre los materiales alternativos estudiados se encuentra el caucho como un agregado en el concreto. El caucho es un tema de interés que se presenta actualmente, ya que existen grandes cantidades de neumáticos desechados, una vez cumplido su ciclo de vida útil. La eliminación inadecuada de neumáticos tiene un impacto negativo en el medio ambiente a nivel global, ya que estos no son biodegradables y suelen ser depositados en vertederos no controlados o abandonados en áreas públicas. En Culiacán, el problema ambiental relacionado con los desechos de neumáticos se debe en gran medida a la falta de conocimiento en cuanto a la gestión de residuos, tanto por motivos culturales como por la

ausencia de políticas e investigaciones sobre la reutilización de estos residuos. La eliminación de los neumáticos desechados mediante la quema se considera una solución típica, pero esta práctica ha demostrado causar graves incendios y contaminación ambiental.

En México, se estima que anualmente se desechan 32 millones de neumáticos, pero solo se recicla el 10% de ellos. No obstante, la cantidad de neumáticos desechados no ha sido evaluada adecuadamente, debido a que no existe un sistema nacional de baja de vehículos que permita un cálculo confiable de las llantas que son descartadas cada año (López 2018). La utilización de residuos de neumáticos como agregados en la producción de concreto genera un concreto amigable con el medio ambiente, ya que evita la necesidad de extraer y procesar agregados naturales. Además, el uso de estos residuos reciclados como agregados en el concreto contribuye a conservar los recursos naturales y brinda una segunda oportunidad de uso a estos materiales desechados (Sivakrishna et al. 2020).

Otro constituyente principal en el concreto es el cemento, material de construcción más fabricado en el mundo, ya que se caracteriza por ser resistente y duradero, de bajo costo y de gran diversidad de aplicación, pero un problema es su alta temperatura de fabricación, la cual genera contaminantes. La producción global de cemento ha experimentado un aumento debido al crecimiento de la población, que genera una mayor necesidad de recursos naturales para construir nuevas áreas residenciales. La fabricación de cemento se caracteriza por ser uno de los procedimientos con un alto consumo de energía, lo que conlleva a un impacto ambiental negativo. Además, estas actividades también tienen un efecto perjudicial en la salud humana, ya que las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) relacionadas con la producción de cemento provienen de la calcinación, la quema de combustibles y las emisiones indirectas relacionadas con la generación de electricidad (Gonzales y Saldaña 2020).

Estudios estiman que las emisiones de CO₂ derivadas de la producción de cemento, aumenten hasta cien mil millones de toneladas métricas para el 2040. Se ha reportado que durante el proceso de producción de cemento (Kajaste y Hurme

2016), alrededor del 65% de las emisiones de CO₂ se deben principalmente a la calcinación del carbonato de calcio y el 35% restante proviene de la energía necesaria para alcanzar las temperaturas del proceso de sinterización (entre 1350 °C y 1450 °C), lo cual implica su generación directa (combustión de combustibles fósiles) o indirecta (producción de electricidad) durante todo el proceso. Durante la descomposición térmica del carbonato de calcio en óxido de calcio se producen 440 Kg de CO₂ por cada tonelada de clinker (Sousa y Bogas 2021).

Entre las alternativas más viables para reducir el uso de cemento es el uso de metacaolín (MK, por sus siglas en inglés) como un material cementante en sustitución al porcentaje de cemento del concreto. Desde tiempos antiguos se ha empleado materiales cementantes, pero fue la civilización romana la que descubrió su potencial, utilizándolos en forma de morteros o pastas a base de arcilla, yeso o cal para unir mampuestos en sus construcciones. Posteriormente, la antigua civilización griega extrajo cementos naturales de la isla de Santorini, evolucionando hasta la elaboración del cemento utilizado en la actualidad (Rodríguez 2016).

En esta investigación se realizó un diseño de mezcla de concreto utilizando materiales reciclados, con un porcentaje de agregado reciclado fino el cual se obtuvo del caucho de neumáticos. También se sustituyó un porcentaje de cemento por MK. Dicho diseño se analizó para así conocer su desempeño mecánico y se propuso un posible uso en andadores.

Para esto, se eligieron los materiales de partida y con base en la literatura, se seleccionaron los porcentajes de reemplazo para caucho y MK. Posteriormente, se eligió una dosificación y diseño para un concreto, que cumpliera con las características necesarias para su implementación en andadores. Una vez obtenida la dosificación, se realizaron ensayos que determinaron las propiedades físicas y mecánicas las cuales fueron de ayuda para determinar las resistencias que el diseño pudo alcanzar y así brindar seguridad y estabilidad en obra. Finalmente, se brindó la propuesta de utilizarlo en andadores, bajo el régimen de las reglas técnicas de construcción.

1.2 Planteamiento del problema

En todo el mundo, muchas industrias están produciendo diversos materiales de residuos sólidos que suelen ser depositados en vertederos o espacios abiertos, lo que representa una amenaza de contaminación para el medio ambiente, un ejemplo de ellos son los desechos de neumáticos. Por otro lado, la producción de concreto consume una gran cantidad de agregados cada año, y es posible que las fuentes naturales de estos agregados no sean capaces de satisfacer la creciente demanda. Por lo tanto, es crucial buscar otros materiales de diferentes fuentes para complementar el suministro de los recursos naturales (Sivakrishna et al. 2020).

En los últimos tiempos, la producción y uso de concreto en la industria de la construcción ha aumentado considerablemente debido a su fiabilidad en cuanto a resistencia, durabilidad y aspectos económicos en comparación con otros materiales de construcción. De media, se produce alrededor de una tonelada de concreto por año por cada persona en todo el mundo (Marie y Quiasrawi 2012).

La producción de esta gran cantidad de concreto se basa en el uso de una gran cantidad de materiales naturales, como agregados gruesos y finos. Se estima que se emplean alrededor de 40 mil millones de toneladas de agregados naturales cada año en todo el mundo (Tam, Soomro y Evangelista 2018). El consumo inmoderado de agregados naturales ocasiona el agotamiento de estos recursos, generando escasez de los mismos en múltiples países alrededor del mundo (Mukharjee y Barai 2014b).

Además, la generación y tratamiento de los agregados naturales conllevan una considerable emisión de partículas de polvo, ruido y gases de efecto invernadero, lo cual provoca un impacto ambiental negativo de gran magnitud (Mukharjee y Barai 2014). Por consiguiente, la sociedad actual se encuentra altamente preocupada por la necesidad de encontrar una fuente alternativa de agregados.

La sociedad se encuentra ante desafíos vinculados a la gestión y disposición de desechos sólidos, como ocurre con los neumáticos. El caucho, empleado como material primario en la producción de neumáticos, se adquiere de fuentes tanto

naturales como sintéticas y se combina con azufre, carbón, antioxidantes y otros componentes, lo que complica el proceso de reciclaje (Hernández 2018).

En Estados Unidos, cada año se desechan más de 300 millones de neumáticos usados de automóviles, lo cual representa un importante problema tanto en términos de manejo de residuos como en el ámbito medioambiental. La mayoría de estos neumáticos acaban en vertederos, ocupando un gran espacio y generando riesgos de plagas e incendios debido a la liberación de sustancias químicas peligrosas (Cabanillas 2017).

Los neumáticos se fabrican a partir de una combinación de caucho natural, caucho sintético y otros materiales como cables, textiles y diversos productos químicos. El reciclaje de neumáticos presenta un desafío significativo debido a su elevado costo. Aunque los neumáticos fabricados con caucho natural pueden considerarse más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, la mayoría de los neumáticos utilizan una alta proporción de caucho sintético, el cual se obtiene a partir de hidrocarburos, lo que los convierte en altamente contaminantes en caso de incineración (Cabanillas 2017).

La eliminación de los neumáticos usados mediante la incineración es un método barato y fácil, pero produce graves riesgos de incendio y contaminación ambiental. En Francia, que produce más de 10 millones de neumáticos usados al año, la disponibilidad de vertederos disminuyó después de que una nueva ley prohibiera la construcción de nuevos vertederos o la incineración de neumáticos en el país a partir de julio de 2002. Por lo tanto, se necesitaban técnicas sostenibles para reutilizar estos residuos. Entre estas técnicas se encuentra el uso de neumáticos desechados como combustible en hornos de cemento, construcción de carreteras, aplicaciones de ingeniería civil, especialmente trabajos geotécnicos, y como agregado en productos a base de cemento (Ramdani et al. 2019).

Debido a que el uso de agregados reciclados en el concreto resulta en una disminución de sus propiedades, varios investigadores han propuesto diversos métodos para mejorar estas propiedades y lograr características similares a las del concreto con agregados naturales. Esto se inclina al uso de materiales cementantes

suplementarios o uso de materiales puzolánicos como MK, humo de sílice, ceniza volante y escoria de alto horno (Muduli y Mukharjee 2020).

La sociedad actual se basa en la construcción de infraestructuras utilizando cemento, pero es importante tener en cuenta que su producción causa un daño significativo al medio ambiente debido a la alta emisión de CO₂ durante el proceso. Aunque el cemento seguirá siendo ampliamente utilizado debido a su disponibilidad, se están llevando a cabo investigaciones para sustituir parcial o totalmente el cemento por materiales cementantes alternativos. Estos materiales pueden provenir de residuos de procesos industriales o de productos que requieren menos energía para su fabricación, como el MK y el caucho de neumático, que se generan en grandes cantidades debido a la falta de cultura de reciclaje (Féliz 2018).

Con este proyecto se busca diseñar un concreto a base de agregado fino reciclado producto del caucho proveniente de neumáticos en desuso y uso de MK como reemplazo del cemento, lo que ayudará a reducir el volumen en vertederos y a brindar un segundo uso a estos materiales considerados ya un desecho, al mismo tiempo que se estará reduciendo la explotación de ríos y canteras para el suministro de agregado natural, y el uso del cemento el cual tiene un impacto negativo sobre el medio ambiente al momento de su producción ya que genera grandes cantidades de CO₂, todo esto implementado en andadores de uso peatonal.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar y evaluar el desempeño físico y mecánico de un concreto para su uso en andadores, utilizando agregados reciclados producto del caucho proveniente de neumáticos en desuso y MK como reemplazo de cemento, y así brindar un aporte positivo al medio ambiente.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Determinar las características físicas del cemento, agregados, caucho y MK mediante pruebas en laboratorio para la elaboración de un concreto adicionado con caucho y MK.
2. Realizar pruebas físicas y mecánicas a mezclas de mortero utilizando diferentes porcentajes de remplazo de caucho y MK para conocer su comportamiento.
3. Diseñar la dosificación de mezcla de concreto a base de caucho y MK que cumpla con los estándares mínimos señalados en la normatividad vigente para ser utilizados en la elaboración de las mezclas.
4. Determinar las propiedades mecánicas, obtenidas por la mezcla de concreto a base de caucho y MK, mediante pruebas en laboratorio de compresión, flexión, módulo elástico e impacto por caída libre para definir sus propiedades.
5. Proponer un diseño de pavimento de andadores realizados con concreto a base de caucho y MK bajo las normas técnicas de construcción.

1.4 Hipótesis

La incorporación de caucho reciclado de neumáticos en desuso y de MK en la fabricación del concreto tiene el potencial de proporcionar resistencia adecuada para su empleo en andadores locales. Simultáneamente, esta práctica contribuirá en la reducción del impacto ambiental derivado de los residuos de caucho, promoviendo así la sostenibilidad en la industria de la construcción.

1.5 Justificación

Recientemente, en la industria de la construcción se presentan distintos patrones de suministro, gran demanda de materiales y una creciente preocupación por construir y al mismo tiempo cuidar al medio ambiente. Como resultado, esta industria muestra un fuerte compromiso en reducir el uso de recursos naturales, fomentando la implementación de métodos de construcción sustentables.

La industria de la construcción tiene un alto consumo de recursos naturales y está estrechamente vinculada al crecimiento tecnológico e industrial del país. Diferentes sectores de la sociedad han adoptado enfoques de sostenibilidad en busca de alternativas para reducir los impactos ocasionados por el uso indefinido en muchos casos de materias primas y la generación de grandes volúmenes de residuos, incluyendo los neumáticos desechados. La utilización de residuos como materia prima en la construcción no solo ayuda a minimizar la extracción de recursos naturales, como arena y grava, sino que también contribuye a disminuir la acumulación de estos residuos en áreas urbanas. Esta solución técnica aporta beneficios a las edificaciones, como una menor densidad, mejor drenaje y mejoras en el aislamiento térmico y acústico (D'Aureliano et al. 2019).

La incorporación de caucho de neumáticos en la fabricación de concreto ayuda a abordar uno de los problemas ambientales más urgentes: la eliminación de residuos sólidos. La acumulación de neumáticos desechados en el medio ambiente es motivo de gran preocupación, ya que el caucho no se degrada fácilmente. Hay varios estudios que tratan sobre la fabricación de concreto utilizando caucho de neumáticos, los cuales resaltan las oportunidades que este material ofrece para sustituir parcialmente los agregados de origen natural. Esto resulta en una contribución al medio ambiente al utilizar un residuo contaminante en lugar de recursos naturales limitados (Fioriti et al. 2020).

El cemento es ampliamente utilizado en la construcción debido a su disponibilidad y versatilidad. Sin embargo, su producción genera una significativa cantidad de contaminación por CO₂ a nivel mundial. A medida que el desarrollo y la urbanización continúan, se seguirá utilizando este tipo de cemento, a menos que se encuentren

materiales cementantes alternativos que ofrezcan características similares (Félix 2018).

Por consiguiente, existe un interés creciente en la industria de la construcción por reemplazar parcialmente el cemento con materiales de menor consumo energético, como el MK, que posean propiedades cementantes, resistencia y durabilidad equivalentes o superiores a las del concreto convencional. Este enfoque se ha convertido en un área de estudio prioritaria.

Esta sustitución tendría como resultado una disminución del impacto ambiental ocasionado por las emisiones de gases generadas durante la producción de cemento, gracias al uso de procesos de producción más eficientes. Además, se abriría la posibilidad de aprovechar materiales acumulados y contaminantes, como lo es el caucho de neumáticos en desuso, en consonancia con los principios de sostenibilidad que se promueven en la actualidad.

Este proyecto incide en uno de los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) del CONACYT, el cual es “agentes tóxicos y procesos contaminantes”. En esta investigación se proporciona una alternativa mediante la adición de caucho y MK en la fabricación de morteros y concretos, que tenga un impacto positivo en el medio ambiente y permita la utilización de materiales que comúnmente se desechan y que están acumulándose cada vez más en los vertederos urbanos. Cada día las áreas para la recolección de residuos de neumáticos en desuso están en aumento, trayendo consigo una contaminación en los hábitats de muchas especies, así como contaminación en el suelo, y provocando un mal aspecto a la ciudad. Brindarle un segundo uso a este material desechado, ayudaría a reducir los vertederos y, por lo tanto, se estará aportando un beneficio al medio ambiente. De igual manera el uso de un remplazo del cemento por MK, estará aportando un beneficio al medio ambiente al estar contribuyendo en una reducción del uso de cemento, debido a que su producción es culpable de la generación de miles de toneladas de CO₂ al año.

Finalmente, se planea compartir los resultados obtenidos en dicha investigación a través de un artículo científico y exposiciones de conocimientos educativos sobre el

área, con el propósito de brindar información que contribuya a generar futuras investigaciones sobre el tema y que apoyen a mejorar o nutrir dicha investigación sobre el tema de concreto adicionado con caucho y MK. El objetivo es que más personas conozcan de los beneficios y se comience a implementar más este tipo de concreto en andadores.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Cemento

El cemento, un material pulverizado fino, no posee propiedades conglomerantes por sí mismo, sino que adquiere dichas propiedades mediante la hidratación, que es la reacción química entre los minerales del cemento y el agua. Un cemento se considera hidráulico cuando los productos de su hidratación permanecen estables en presencia de agua. El cemento Portland es el cemento hidráulico más utilizado en la fabricación de concreto. Está compuesto principalmente por silicatos de calcio hidráulico. Los hidratos de silicato de calcio formados durante la hidratación del cemento Portland son los principales responsables de sus propiedades adhesivas y son estables en medios acuosos (Mehta y Monteiro 1998).

Pérez (2014), en su investigación explica el proceso de fabricación del cemento el cual se distingue por tres etapas principales:

- I. Obtención y preparación de materias primas
- II. Fabricación de Clinker-Horno
- III. Molienda de cemento

El proceso de producción del cemento comienza con la extracción de las materias primas que se encuentran en canteras, generalmente a cielo abierto. Las canteras se explotan mediante voladuras controladas en el caso de materiales duros como calizas y pizarras, mientras que para materiales blandos como arcillas y margas se utilizan excavadoras. Una vez extraído y clasificado el material, se procede a triturarlo hasta obtener el tamaño adecuado para la molienda. Después, estos materiales se muelen en molinos verticales o de bolas para reducir su tamaño y facilitar su posterior cocción en el horno. La alimentación al horno se realiza a través de un precalentador de ciclones, que calienta la materia prima para favorecer su cocción. La materia prima molida, también conocida como harina o crudo, se introduce en la torre del horno por la parte superior y va descendiendo a lo largo de ella. Mientras tanto, los gases calientes ascienden a contracorriente, precalentando

el crudo que alcanza temperaturas de hasta 1000°C antes de ingresar al horno. A medida que la harina avanza en el interior del horno, que está en rotación, la temperatura aumenta gradualmente hasta llegar a los 1500°C. En este proceso se producen reacciones químicas complejas que resultan en la formación del clinker. Para alcanzar las temperaturas necesarias, el horno cuenta con una llama principal que arde a 2000°C. Una vez obtenido el clinker, se mezcla con yeso y otros aditivos en proporciones adecuadas dentro de un molino de cemento. En el interior del molino, los materiales se muelen, mezclan y homogenizan. Los molinos pueden ser de rodillos (horizontales y verticales) o de bolas, siendo estos últimos grandes tubos que rotan y contienen bolas de acero en su interior. Gracias a la rotación del molino, las bolas colisionan entre sí, triturando el clinker y los aditivos hasta obtener un polvo fino y homogéneo: el cemento (Pérez 2014).

2.1.2 Agregados

Los agregados son materiales pétreos naturales seleccionados; materiales sujetos a tratamientos de disgregación, cribado, trituración o lavado, o materiales producidos por expansión, calcinación o fusión excipiente, que se mezclan con cemento y agua, para formar concreto hidráulico (SCT 2019).

Las clasificaciones de los agregados de acuerdo con la dimensión de las partículas, da lugar a una nomenclatura especial que deberá ser entendida claramente. Por ejemplo, el término agregado grueso (gravas) se utiliza para describir partículas mayores de 4.75 mm (retenidas en una malla No. 4), y el término agregado fino (arenas) se utiliza para las partículas menores de 4.75 mm; generalmente los agregados finos contienen partículas dentro del rango de 75 µm (malla No. 200) a 4.75 mm y los agregados gruesos de 4.75, a aproximadamente 50 mm (Mehta y Monteiro 1998). En la Figura 1 se muestra la diferencia entre arenas y gravas.



Figura 1. Agregado fino y agregado grueso.

2.1.3 Grano de caucho reciclado

Se trata de un caucho reciclado proveniente de neumáticos desechados que ha sido modificado y se presenta en diferentes granulometrías suministradas por los proveedores, en la Figura 2 se expone una muestra de caucho triturado.

En diferentes partes del mundo, se están explorando oportunidades para utilizar este residuo como un componente en proyectos de construcción. Se ha empleado en la creación de mezclas asfálticas en caliente, en la edificación de muros aislantes, en la manufactura de superficies sintéticas para canchas deportivas e incluso en España se ha utilizado el caucho granulado junto con resina de poliuretano como material aislante acústico para los soportes de rieles en diversas líneas ferroviarias en el país. Este material demuestra su versatilidad en su aplicación, permitiendo aprovechar muchas de las propiedades inherentes del caucho. (Román y Garzón 2015).



Figura 2. Caucho triturado.

2.1.4 Materiales cementantes suplementarios

Un material cementante suplementario (MCS) puede definirse como un material que, cuando se utiliza en conjunto con el cemento, contribuye a las propiedades del concreto endurecido a través de la actividad hidráulica, puzolánica, o ambas (CSA A3001 2003). Los MCS que se emplean comúnmente en el concreto hoy en día incluyen cenizas volantes, escoria de alto horno granulada molida, humo de sílice y una amplia gama de puzolanas naturales (Thomas 2013).

Una puzolana se define como un material silíceo o silíceo y aluminoso que en sí mismo posee poco o ningún valor cementoso pero que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con hidróxido de calcio (un producto de hidratación del cemento) a temperaturas ordinarias para formar compuestos con propiedades cementosas (ACI 116 2000).

Los MCS experimentan reacciones químicas en el concreto y los productos de la reacción son de naturaleza cementosa; es decir, los productos ayudan a unir los componentes del concreto de la misma manera que los productos de reacción (o hidratación) del cemento (Thomas 2013).

2.1.4.1 Puzolana natural

El American Concrete Institute (ACI 116 2000), define una puzolana natural como una sustancia que se encuentra en su estado natural o que ha sido sometida a un proceso de calcinación y que muestra propiedades puzolánicas. Entre los ejemplos de puzolanas naturales se incluyen la ceniza volcánica, la pumicita, el chert opalino, las lutitas, las tobas y ciertas tierras diatomáceas.

Las puzolanas naturales abarcan una amplia gama de materiales con diversas propiedades. Las puzolanas naturales, como la ceniza volcánica, se utilizaron en combinación con cal para producir los primeros conglomerantes hidráulicos hace más de 2000 años. A pesar de su uso milenario y su continua aplicación en la actualidad, estas puzolanas son menos comunes en la mayoría de los países en comparación con los subproductos industriales ampliamente disponibles, como la ceniza volante y la escoria (Thomas 2013).

2.1.4.2 Metacaolín

El MK es un MCS, que se obtiene mediante la calcinación del caolín a temperaturas aproximadas de 500°C a 600°C, lo que conduce a una modificación en su estructura cristalina. Su principal aplicación se centra en aprovechar su composición química y su capacidad de reacción, utilizándolo como una puzolana artificial en la fabricación de mortero y concreto. Se reconoce su valiosa contribución en términos de resistencia mecánica, reducción de la permeabilidad y durabilidad en estos materiales. Su actividad puzolánica, especialmente en las etapas iniciales, puede ser comparable o incluso superior a la del humo de sílice y las cenizas volantes. Además, una ventaja significativa del MK es su color blanco, lo que lo hace adecuado para aplicaciones especiales, e incluso su uso en la producción de cemento blanco adicional (Gutiérrez, Baena y Tobón 2006).

Desde la construcción de una serie de grandes presas en Brasil a partir de 1962, se ha utilizado MK en el concreto. El MK se produce mediante la activación térmica de arcilla de caolín y es un material puzolánico (Saad, Andrade y Paulon 1982). Se ha utilizado el término "MK de alta reactividad" para diferenciar la arcilla de caolín de alta pureza activada térmicamente (también conocida como arcilla china) de las arcillas mezcladas calcinadas con menor capacidad de reacción (Gruber et al. 2001). En la Tabla 1, se muestra la composición química que tiene el MK (Lost on Ignition).

Tabla 1. Composición química del MK.

Puzolana	Composición (%)						
	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>Na₂Oe</i>	<i>LOI</i>
MK	51.52	40.18	1.23	2.00	0.12	0.53	2.01

Fuente: (Thomas 2013).

2.1.4.3 Efecto puzolánico del metacaolín con el cemento

Según lo establecido por Sha y Pereira (2001), durante el proceso de hidratación del cemento, el MK reacciona con el hidróxido de calcio libre, representado como $[Ca(OH)_2]$, dando lugar a la formación de un compuesto secundario conocido como silicato dicálcico (C_2S). Más adelante, este compuesto se transforma en el gel de

silicato de calcio hidratado o gel de tobermorita, el silicoaluminato bicálcico hidratado (gehlenita) y, en ocasiones, también se pueden generar hidrogranates (hydrogarnet). Estos productos contribuyen positivamente a la mejora de las propiedades mecánicas de las mezclas.

Las diversas investigaciones llevadas a cabo con MK han brindado una visión general del desarrollo de estos estudios, evidenciando el interés de los investigadores en este material. Su aplicación principal se ha centrado en aprovechar su composición química y su capacidad de reacción para utilizarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y concretos. Se reconoce que el MK contribuye significativamente al mejoramiento de las resistencias mecánicas, la reducción de la permeabilidad y el aumento de la durabilidad de dichas mezclas (Caldarone, Gruber y Burg 1994).

Investigaciones de Gutiérrez (2006), sobre la actividad puzolánica del MK, manifiestan numerosas ventajas que ofrece en comparación con los cementos Portland sin adiciones. Estas ventajas incluyen:

- Incremento de las propiedades mecánicas, especialmente a edades tempranas.
- Mayor resistencia al ataque de sulfatos.
- Mejora en la resistencia a la reacción álcali-sílice (ASR).
- Refinamiento de los poros, lo que resulta en una mayor densidad del material.
- Reducción de la permeabilidad, lo que contribuye a una mayor durabilidad.
- Disminución de la corrosión en las estructuras de refuerzo.
- Menor generación de calor durante el proceso de hidratación.

2.1.5 Mortero

Los morteros representan composiciones que constan de un aglomerante, arena y agua, y se emplean en la construcción para unir bloques o piedras, así como para recubrirlos con enlucidos o revestimientos. Estos morteros pueden variar en su denominación en función del tipo de aglomerante empleado, incluyendo opciones como mortero de yeso, de cal o de cemento. Los distintos componentes del mortero

desempeñan diversas funciones: el cemento aporta resistencia a las mezclas, la cal contribuye a la retención de agua, lo que facilita un adecuado proceso de fraguado, y la arena proporciona estabilidad volumétrica al conjunto del mortero (Orbegoso y Quezada 2021).

2.1.6 Propiedades del mortero

2.1.6.1 Trabajabilidad

La trabajabilidad es una característica del mortero que le confiere cierto grado de plasticidad, lo cual permite colocar las unidades de albañilería de manera alineada y regular, asegurando una buena adherencia al penetrar el mortero en los espacios vacíos entre las unidades. En la actualidad, no existe un método específico para cuantificar la trabajabilidad. En los laboratorios, se relaciona con las propiedades de consistencia y retentividad del mortero. Sin embargo, en la obra, la trabajabilidad es fácilmente reconocible por un albañil experimentado (Quispe 2018).

2.1.6.2 Consistencia

Propiedad del mortero que se refiere a su capacidad de fluir y está directamente influenciada por la cantidad de agua presente en la mezcla. La consistencia ideal del mortero varía según el tipo de aplicación que se le dará, y en la práctica se establece que, para lograr una trabajabilidad óptima, la fluidez debe estar en un rango de 110% \pm 5%. La medición de la consistencia se realiza mediante la evaluación del flujo, expresado como un porcentaje según la norma NMX - 061 – ONNCCE (Quispe 2018). En la Figura 3, se presenta una muestra de mortero en estado fresco con una fluidez de 115%.



Figura 3. Mortero con fluidez de 115%.

2.1.7 Concreto

El concreto es una mezcla compuesta por cemento, agregados inertes como arena y grava, y agua. Esta mezcla se endurece con el tiempo, formando una estructura similar a la piedra. Los componentes activos del concreto son el agua y el cemento, que reaccionan químicamente y se solidifican, brindando una gran solidez. Los elementos inertes, como la arena y la grava, forman el esqueleto de la mezcla y ocupan la mayor parte del volumen final del producto, lo que reduce su costo y disminuye los efectos de la reacción química de la "lechada" (Mehta y Monteiro 1998).

El concreto es el material de construcción más utilizado debido a varias razones. En primer lugar, tiene una alta resistencia al agua sin sufrir un deterioro significativo. Además, puede ser moldeado en una amplia variedad de formas y tamaños debido a la trabajabilidad de la mezcla. Esto lo hace muy popular entre los ingenieros civiles, ya que está fácilmente disponible en las obras y tiene un costo relativamente bajo (Mehta y Monteiro 1998).

2.1.8 Dosificación de mezclas de concreto

La dosificación implica elegir las proporciones ideales de cada uno de los materiales que conforman la mezcla de concreto, de modo que se pueda obtener un producto que tenga la adecuada trabajabilidad y consistencia en su estado no endurecido,

como se muestra en la Figura 4, y que cumpla con los requisitos de resistencia, impermeabilidad y durabilidad establecidos una vez que se haya endurecido.



Figura 4. Mezcla de concreto.

2.1.9 Propiedades del concreto en estado fresco

2.1.9.1 Revenimiento

Este ensayo tiene como finalidad evaluar la consistencia del concreto, lo cual es un parámetro que indica la facilidad con la que se puede colocar, manipular y compactar la mezcla. Para llevar a cabo este ensayo, se sigue la norma NMX-C156-ONNCCE y se utiliza el cono de Abrahams. El objetivo de este ensayo es verificar que las mezclas preparadas tengan una consistencia adecuada, es decir, un nivel de revenimiento típico para el concreto proyectado al salir de la boquilla, que se recomienda estar en el rango de 4 a 7.5 centímetros (Hernández 2017).

2.1.9.2 Masa volumétrica

La masa volumétrica es definida como la cantidad de materia contenida en un metro cúbico de concreto fresco, expresada en kg/m^3 . Para llevar a cabo este ensayo, se sigue la norma NMX-C162-ONNCCE. En el estado fresco del concreto, la masa unitaria (también conocida como peso unitario) es un indicador fundamental de su desempeño y calidad. El proporcionamiento de la mezcla de concreto y su impacto en la densidad volumétrica pueden revelar un posible "sobrerendimiento", lo que implica una reducción en la cantidad de cemento necesario para producir un mayor volumen de concreto. Además, modificaciones en los materiales, contenido de agua

y contenido de aire también pueden afectar la masa volumétrica del concreto. Estas variaciones en el peso volumétrico pueden tener diversas repercusiones en la mezcla, desde afectaciones en la resistencia mecánica hasta la capacidad de bombeo, colocación, acabado y otras cualidades deseables en el concreto. En el caso del concreto estructural convencional, la masa volumétrica generalmente varía entre $1,900 \text{ kg/m}^3$ y $2,400 \text{ kg/m}^3$ (Villa 2018).

2.1.10 Propiedades del concreto endurecido

2.1.10.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se puede describir como la máxima capacidad de un material para soportar una fuerza de compresión o aplastamiento. Para llevar a cabo este ensayo, se sigue la norma NMX-C083-ONNCCE. En el caso del concreto, esta resistencia se obtiene mediante ensayos de compresión en probetas cilíndricas, dividiendo la carga máxima aplicada hasta la fractura entre el área inicial de la probeta, expresada en unidades de presión (kg/cm^2) (Villa 2018).

La práctica de determinar y reportar la resistencia a la compresión surge con el propósito de verificar que concreto satisface los criterios de resistencia especificados ($f'c$) en el proyecto. Además, la resistencia a la compresión se utiliza para el control de calidad, aceptación de la mezcla y planificación de la obra, como la remoción de encofrados y el proceso de curado. En la actualidad, esta medida se emplea como referencia para el diseño de estructuras y edificaciones. Sin embargo, es importante destacar que la calidad del concreto no se limita únicamente a esta propiedad mecánica, ya que también depende de la resistencia individual de los agregados, la pasta cementante y la adherencia entre ellos (Villa 2018).

2.1.10.2 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión del concreto se refiere a su capacidad para resistir la tracción. Para llevar a cabo este ensayo, se sigue la norma NMX-C191-ONNCCE. Esta medida evalúa la capacidad de una viga o losa de concreto sin refuerzo para resistir la falla por momento. Se determina aplicando cargas a vigas de concreto con una sección transversal de 6 x 6 pulgadas (150 x 150 mm) y una longitud de al menos tres veces el espesor. La resistencia a la flexión se expresa mediante el

Módulo de Rotura (MR) en libras por pulgada cuadrada (MPa). El MR generalmente oscila entre un 10% y 20% de la resistencia a la compresión y varía según el tipo, las dimensiones y la cantidad del agregado grueso empleado. Sin embargo, la correlación más precisa para materiales específicos se obtiene a través de ensayos de laboratorio y el diseño de la mezcla correspondiente. Vale la pena resaltar que el MR calculado utilizando una viga cargada en los puntos tercios generalmente exhibe valores más bajos que el MR obtenido mediante una viga cargada en su punto medio, en ocasiones disminuyendo hasta en un 15% (NRMCA 2017).

2.1.10.3 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del concreto es una característica mecánica que refleja la rigidez de un material. Para llevar a cabo este ensayo, se sigue la norma NMX-C128-ONNCCE. Su análisis resulta fundamental, ya que proporciona información sobre las deformaciones que experimenta dicho material al someterlo a esfuerzos. Es crucial tener conocimiento tanto de la resistencia como de la deformación que presenta un material destinado a desempeñar funciones estructurales, al aplicarle una carga específica. Dado que el módulo de elasticidad se refiere a la cantidad de deformación que experimenta un material al someterlo a fuerzas de compresión por debajo de su límite elástico, se recomienda que las cargas aplicadas no superen el 40% de la carga máxima de resistencia del concreto (Carvajal y González 2014).

2.2 Estado del arte

Bustamante (2008), presenta los resultados de una investigación sobre la fabricación de losas de mortero que contienen tanto cemento común como MK, y que incorporan fracciones crecientes de polvo de caucho triturado procedente de neumáticos desechados, llegando a superar el 30% en volumen del producto final. Se concluye que la adición de polvo de caucho mejora la capacidad de aislamiento térmico de los morteros de cemento, lo que los convierte en materiales adecuados para revestimientos y morteros de albañilería que buscan mejorar el aislamiento térmico y la resistencia al impacto. Los resultados de los ensayos mecánicos demuestran la utilidad del caucho al reducir el peso en las losas, especialmente en

soleras, y la capacidad de deformación dúctil, lo que puede ser beneficioso para elementos constructivos sujetos a deformaciones.

Pelisser (2012), en su proyecto estudió la utilidad del caucho reciclado de neumáticos para la fabricación de concreto ligero con adición de MK, con el doble propósito de reducir el consumo de cemento y lograr resistencia satisfactoria. El concreto ligero (en el cual se sustituyó la arena por caucho) fue evaluado mediante pruebas de resistencia a la compresión, calorimetría y conductividad térmica del mortero. Los resultados mostraron que la producción de mortero con un 40% de caucho proporciona una resistencia a la compresión de 20 MPa.

Torres (2014), para el desarrollo del trabajo se prepararon cuatro tipos de mezclas utilizando distintos porcentajes de remplazo de caucho por agregado fino en volumen 0%, 10%, 20% y 30%. Se observó que la resistencia a la compresión y flexión disminuye con la adición de caucho en la mezcla. Respecto a los valores de absorción superficial, estos demuestran un buen comportamiento a los 90 días, comparadas con aquellas muestras que presentaban un menor porcentaje de sustitución de caucho. Se concluye, que las propiedades eléctricas de cada mezcla son únicas y varían respecto a la edad de ensayo y a la velocidad a la que circula la corriente eléctrica a través de las muestras, así mismo la resistividad de las muestras disminuye con el aumento en porcentaje de adición de caucho.

Peñaloza (2015), llevó a cabo la preparación de una mezcla de concreto donde incorporó caucho reciclado en su diseño con el propósito de fortalecer su estructura. En este proceso, se sustituyó el agregado fino por granos de caucho reciclado en cantidades que variaban entre el 10% y el 30%, y realizó pruebas de compresión. Finalmente, analizó los resultados de resistencia obtenidos y determinó la viabilidad de emplear el caucho reciclado como sustituto del agregado convencional.

Ismail (2016), el objetivo de la investigación fue examinar las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto autocompactante con caucho (SCRC) que contenían altos porcentajes de caucho granulado (CR). Se enfocó en investigar el impacto del MK en comparación con otros materiales cementantes suplementarios (MCS) para mejorar las propiedades mecánicas y la estabilidad de las mezclas de

SCRC. Los resultados demostraron que la incorporación de MK mejoró la estabilidad de la mezcla y la suspensión de partículas, lo que permitió desarrollar mezclas de SCRC con un alto contenido de CR (30%) y propiedades mecánicas mejoradas.

Rezaifar (2016), se dedicó a optimizar el concreto utilizando caucho reciclado como material de desecho en combinación con MK. El objetivo es reemplazar parcialmente los agregados finos con caucho y parcialmente el cemento con MK. Se encontró que la resistencia a la compresión del concreto disminuyó a medida que aumentaba el contenido de caucho. Sin embargo, se observó que este efecto negativo se puede mitigar en cierta medida al incorporar una cantidad adecuada de MK. Según los resultados obtenidos, se determinó que una mezcla óptima se logra al reemplazar el 3.3% en volumen de arena con caucho reciclado y el 19.5% en volumen de cemento con MK, lo que resulta en un concreto estructural limpio.

Farfán y Leonardo (2018), llevaron a cabo evaluaciones de las capacidades de resistencia a compresión y flexión en concreto con una resistencia nominal de 210 kg/cm². Este concreto fue modificado con la inclusión de un aditivo plastificante utilizando diferentes porcentajes de caucho reciclado en su composición, específicamente 5%, 10% y 15%. Los resultados revelaron que la resistencia a la compresión alcanzó valores de 218.45 kg/cm² y 212.33 kg/cm² cuando se emplearon un 5% y 10% de caucho, respectivamente. En cuanto a la resistencia a la flexión, se obtuvo un valor de 81.86 kg/cm² cuando se utilizó un 10% de caucho en la mezcla. En resumen, se concluyó que el caucho reciclado demostró ser un aditivo valioso para su inclusión en las mezclas de concreto, a pesar de que ocasionó cierta disminución en la resistencia mecánica. Sin embargo, al agregarle un aditivo plastificante, se mejoró su desempeño, lo que hace factible su incorporación en el concreto en proporciones de hasta un 10%.

Hernández (2018), empleó caucho como un componente agregado en las mezclas de concreto, y llevó a cabo evaluaciones utilizando tres diferentes formas de caucho: en forma de polvo, en forma de fibras y en forma de fibras cilíndricas. Realizó mezclas de concreto adicionado con caucho en porcentajes que variaban entre el

5%, 10%, 15%, 20% y 25%, manteniendo constantes las proporciones de cemento, agua, arena y grava. Los resultados de las pruebas de compresión indicaron una disminución en la resistencia y la deformación a medida que aumentaba la cantidad de caucho en las mezclas. De todas las muestras, las que contenían caucho en forma de fibras cilíndricas mostraron la mayor resistencia en relación al contenido de caucho. Por lo tanto, la mezcla de concreto con un 5% de caucho podría considerarse una opción óptima para aplicaciones como recubrimientos o situaciones donde no se requiera una alta resistencia, pero sí las propiedades mencionadas anteriormente.

Mehdipour (2020), en su estudio investigó los efectos del MK como reemplazo del cemento en proporciones del 0%, 10% y 20% en peso de cemento, y dosis de fibra de acero del 0%, 0.25%, 0.5% y 1% en volumen de concreto. Los resultados muestran que la combinación de MK y fibra de acero, no solo mejora las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto con caucho a altas temperaturas, sino que también puede introducir mezclas más respetuosas con el medio ambiente al reducir las emisiones de CO₂ en comparación con un concreto convencional.

Hasanzadeh (2021), realizó una investigación experimental en la que se fabricaron diferentes mezclas de concreto utilizando caucho finamente molido (GR) y MK como reemplazos parciales del cemento. Se crearon 7 mezclas de concreto con tres contenidos de cemento diferentes: 350, 400 y 450 kg/m³, y dos relaciones agua-cemento 0.45 y 0.50. Tanto el caucho como el MK se utilizaron como reemplazos parciales del cemento, en rangos de 0-30% en volumen y 0-20% en volumen, respectivamente. Con base a los resultados, se determinaron las composiciones óptimas de mezcla para el concreto híbrido, con un reemplazo del 4.2% y 19.5% en volumen de cemento por caucho y MK, respectivamente. Estas composiciones de mezcla, permitieron mejorar los resultados en resistencias a la compresión y flexión en aproximadamente un 1-4% y 6-8%, respectivamente, al tiempo que se minimizó la absorción de agua en aproximadamente un 48%.

Jiangnan (2022), realiza una recolección de artículos donde abordan temas sobre la incorporación de caucho reciclado como agregado en compuestos a base de cemento los cuales podrían producir materiales de construcción sostenibles. Menciona que el uso de caucho reciclado tiene un impacto negativo en la resistencia de los compuestos. Sin embargo, la utilización de caucho reciclado tiene el potencial de mejorar varias propiedades del material y podría ser utilizado en compuestos con aislamiento acústico, livianos, resistentes a la congelación-deshielo y térmicos.

Singh (2022), su estudio se centró en analizar las propiedades frescas y de resistencia en un concreto de alta resistencia que incluía un 15% de MK y un máximo de 30% de caucho granulado como sustituto de la arena durante un período de 90 días. Los resultados revelaron una disminución en la trabajabilidad, densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por flexión y módulo de elasticidad. Sin embargo, se observó una mayor capacidad de ductilidad con una sustitución del 20% de caucho granulado, lo que se reflejó en el índice de tenacidad más elevado.

En el estudio realizado por Albidah (2022), se realizaron siete mezclas con dos variables principales: el tamaño del caucho (fino, grueso o una combinación de ambos) y el porcentaje de reemplazo (0%, 20% y 40%). Se observó que la adición de caucho reciclado redujo la trabajabilidad de la mezcla en un rango del 4% al 52.5% y del 40% al 62.5%, el tamaño de partícula del caucho en el concreto fue otro factor determinante en el estudio y los resultados alcanzados. Se lograron valores de resistencia a la compresión entre 14.3 MPa y 37.7 MPa cuando las partículas de caucho fino y/o grueso reemplazaron el 20% o el 40% de los agregados finos y/o gruesos convencionales. Estos resultados indican que el concreto geopolimérico con caucho puede ser una opción adecuada para desarrollar concretos de baja a moderada resistencia, tanto para aplicaciones no estructurales como estructurales.

Singh(2023), investigó la utilización de caucho granulado proveniente de neumáticos usados en un concreto de alta resistencia (HSC) basado en MK, con porcentajes de hasta el 30%. Los resultados obtenidos mostraron que con concentraciones más bajas de caucho granulado (5% y 10%), es posible alcanzar

una resistencia a la compresión superior a 80 MPa, así como una penetración de agua inferior a 30 mm y una profundidad de abrasión inferior a 1 mm al reemplazar hasta el 30% de caucho en el HSC.

Arash(2023), realizó una investigación utilizando caucho en forma de polvo con diferentes porcentajes para sustituir tanto la arena como el cemento en el concreto. En este estudio, se reforzó la mezcla mediante dos métodos físicos: la adición de humo de sílice y el recubrimiento de cemento. Se crearon muestras que abarcaron diferentes porcentajes de reemplazo de cemento (5, 7.5, 10, 12.5, 15%) y de reemplazo de arena (5, 10, 15, 20, 25%). Los resultados obtenidos revelaron que el reemplazo de la arena por caucho en polvo tuvo mejores resultados en términos de resistencia a la compresión en comparación con el reemplazo del cemento. A medida que aumentaba la cantidad de caucho, se observó una disminución en la resistencia a la compresión del concreto en todos los métodos de refuerzo, excepto en aquellos donde se utilizó humo de sílice y recubrimiento de cemento.

3. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló a través de una serie de procedimientos de investigación que se llevaron a cabo en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Culiacán, siguiendo un conjunto de fases tal como se representa en la Figura 5.

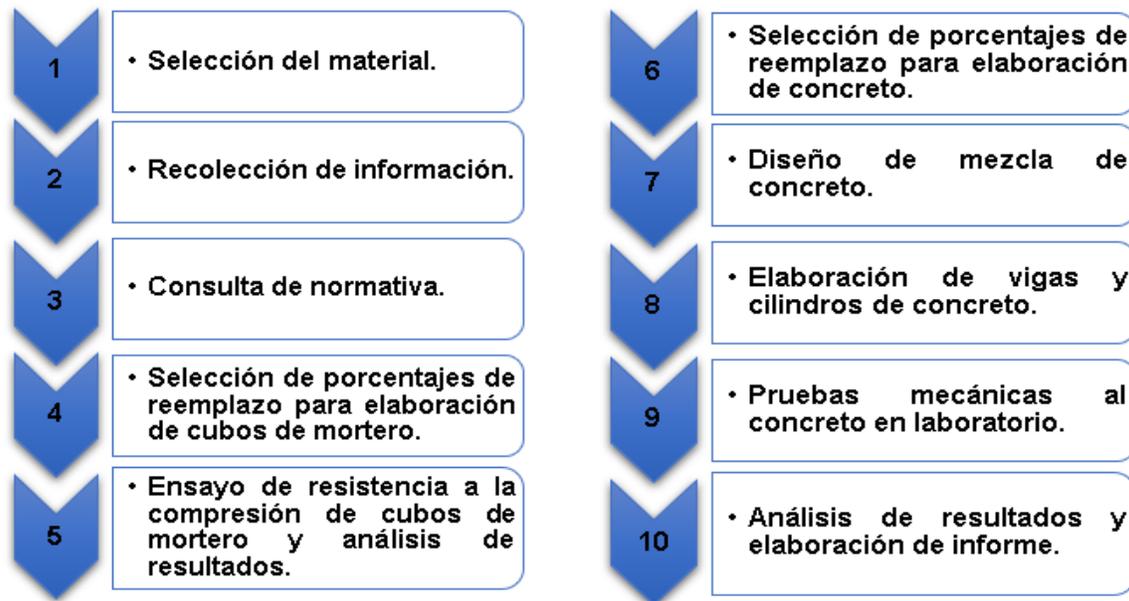


Figura 5. Procedimiento del proyecto.

3.1 Descripción de los materiales

Para el desarrollo experimental se utilizaron los materiales fundamentales que componen al concreto: cemento, agua, agregados, además de, partículas obtenidas del triturado de neumáticos desechados y MK, que son las variables de estudio en este proyecto. En esta sección se presentarán cada uno de estos componentes y se destacarán sus características más relevantes.

3.1.1 Cemento

Se empleó como aglutinante cemento CEMEX CPC 30R extra, el cual cumple con las especificaciones de la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE; se utiliza comúnmente en concretos y trabajos de albañilería. El cemento es ampliamente utilizado y está preparado para fraguar 45 minutos después de agregarle agua, y alcanzar resistencias de hasta 300 kg/cm^2 . Algunas características de este tipo de cemento, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del Cemento CEMEX CPC 30R extra.

Especificaciones Mecánicas	Método de prueba	Resultados	Unidades	Condición del resultado
Resistencia a la compresión a 3 días	NMX-C-061-ONNCCE	204	kg/cm ²	Valor mínimo esperado
Resistencia a la compresión a 28 días	NMX-C-061-ONNCCE	306	kg/cm ²	Valor mínimo esperado
Especificaciones Físicas	Método de prueba	Resultados	Unidades	Condición del resultado
Tiempo de fraguado inicial	NMX-C-059-ONNCCE	45	Minutos	Valor mínimo esperado
Tiempo de fraguado final	NMX-C-059-ONNCCE	600	Minutos	Valor máximo esperado

Fuente: (CEMEX 2020).

3.1.2 Agregados

Se empleó arena y grava procedente del municipio de Culiacán, en Sinaloa, como materiales para la investigación. Estos agregados convencionales fueron cuidadosamente escogidos y adquiridos de un proveedor calificado. Este proveedor garantizó que los agregados cumplieran con propiedades esenciales como el peso específico, la humedad natural y la absorción, las cuales dependen de la procedencia mineralógica de los agregados. Se realizaron pruebas de granulometría, densidad, absorción y masa volumétrica para los agregados finos y gruesos, con el fin de comprobar los datos proporcionados por el proveedor y garantizar la calidad del material, el cual cumpliera con las normas establecidas.

3.1.3 Grano de caucho reciclado

Se utilizó material granular de neumáticos reciclados en la mezcla, que fue obtenido mediante un proceso de triturado mecánico. El material fue donado a la Facultad de Ingeniería Culiacán. El caucho se cribó por la malla #16 (1.19 mm) con la intención

de que su tamaño sea el adecuado para utilizar en morteros. Para la elaboración del concreto, se utilizó caucho cribado por la malla 8" (2.38 mm)

3.1.4 Metacaolín

Se empleó MK en la mezcla, el cual se utilizó como un MCS. El MK utilizado es de la marca "metaforce", el cual es un producto altamente reactivo fabricado con puzolana, el cual tiene la capacidad de mejorar el rendimiento y la resistencia del cemento Pórtland cuando se utiliza en mezclas de mortero y concreto. Este producto cumple con la norma NMX-C-146-ONNCCE vigente. En la Tabla 3, se muestran sus propiedades físicas.

Tabla 3. Propiedades físicas del MK marca "metaforce".

Color	Café claro
Mitigación de la reactividad álcali-agregado a 16 días (%)	>90
Índice de Actividad Puzolánica a 28 días (%)	115 - 125
Requerimiento de agua, % del control	105 - 110
Finura a 45 micras (%)	> 94
Densidad (g/cm ³)	2.65 - 2.68
SiO ₂ (%) + Al ₂ O ₃ (%) + FE ₂ O ₃ (%)	87 - 92

Fuente: (GCC 2020).

3.2 Ensayos realizados para la caracterización de materiales

Se realizaron estudios a características específicas de los materiales empleados en el mortero y concreto estudiado. Los análisis se enfocaron en la evaluación de la granulometría del material y su capacidad de absorción, densidad y masa volumétrica.

3.2.1 Determinación de la granulometría de los agregados

Para calcular la granulometría de los agregados finos y gruesos utilizados en la mezcla de estudio, se siguió el procedimiento con base a la norma NMX-C-077-ONNCCE. Se utilizaron charolas, cucharón, balanza con una aproximación de 0.1 % de la masa de la muestra, horno con una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, agitador mecánico para el proceso de cribado y mallas de cribado.

Primero, se realizó la preparación de la muestra de agregado con base en las normas NMX-C-030-ONNCCE “muestreo” y la NMX-C-170-ONNCCE “reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas”. Después, la muestra elegida se introdujo en el horno hasta que estuvo completamente seca. Luego de un período de 24 horas, se extrajo una muestra de 500 gramos para el agregado fino y 8000 gramos para el agregado grueso. Se colocó la muestra en la criba superior y se tapa, para posteriormente agitar las cribas con un aparato mecánico por 5 minutos. En la Tabla 4, se muestran los tamaños de mallas utilizados.

Tabla 4. Juego de mallas para gravas y arenas.

Agregados	Mallas							
Grava	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	No. 4	Ch
Arena	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	Ch

Por último, se registraron los pesos del material que quedó retenido en cada tamiz y se calcularon los porcentajes de material que pasa, para después realizar la curva granulométrica, revisando que la curva quede dentro de los límites retenidos superior e inferior indicados por la norma. Algunas imágenes de este proceso se muestran en la Figura 6.



Figura 6. Aparato e instrumentos para realizar el ensayo de granulometría a arenas y gravas.

3.2.2 Determinación de la masa volumétrica de los agregados

Se determinó la masa volumétrica suelta y compacta de los agregados finos y gruesos, con el fin de conocer la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen el ocupado por el material en un recipiente especificado. Este procedimiento se realizó de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-073-ONNCCE. Los equipos utilizados fueron báscula, horno con una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, placa de vidrio, varilla, enrasador, cucharon y recipientes, como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Equipo utilizado para el ensayo de masa volumétrica en agregados.

Se realizó la preparación de la muestra de agregado siguiendo las normas ya mencionadas anteriormente. Posteriormente, se tomó la muestra seleccionada y se colocó en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas.

Primeramente, se inició con la prueba de masa volumétrica compacta donde se llenó el recipiente en 3 capas, compactando cada capa con 25 golpes, para luego enrasar y pesar. Luego, se continuó con la prueba de masa volumétrica suelta, en donde se llenó el recipiente hasta que el material sobrepasó el borde sin derramarse, utilizando un cucharon y dejando caer el agregado de una altura de 50 mm sobre el borde del recipiente y distribuyéndolo uniformemente. Finalmente, se pesó el recipiente con el material y se calculó la masa neta del agregado en kg, contenida en el recipiente.

Se procedió con los cálculos mediante la Ecuación 1:

$$MV = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Donde:

MV = Masa volumétrica (kg/m^3).

m = Masa neta del material (kg).

v = Volumen del recipiente (m^3).

3.2.3 Determinación de la densidad de los agregados

Se llevó a cabo el procedimiento para conocer la densidad de la arena y grava. Se realizó el estudio bajo la norma NMX-C-164-ONNCCE buscando cumplir con los requerimientos necesarios para verificar la calidad de los agregados a utilizar en la mezcla de diseño.

3.2.3.1 Determinación de la densidad de la arena

El equipo utilizado fue balanza, fuente de calor, cono truncado, pisón de 340 g de peso, matraz aforado de 500 ml de capacidad, con su curva de calibración, pizeta de plástico, embudo y vaso de aluminio. Primeramente, se realizó la preparación de la muestra de agregado, este se tomó de la misma manera que los estudios anteriores. En la Figura 8, se muestran el equipo empleado en la prueba.



Figura 8. Equipo de matraz, pisón y cono para la prueba de densidad en agregados finos.

Se inició saturando el material en agua durante 24 horas. Este proceso se realizó para la arena y para la grava, en charolas distintas. Para el caso del agregado fino, se tomó la muestra y se decantó el exceso de agua, para después secarla en la estufa hasta que la arena tuviera una condición saturada y superficialmente seca (SSS). Luego, se llevó a cabo la prueba del cono para determinar si la arena había alcanzado un estado SSS. Se continuó con el llenado del cono en 3 capas y compactando las dos primeras con 10 golpes y la última con 5 golpes. Se conoce

que el agregado llegó a la condición SSS cuando al retirar el molde, el material de la muestra se disgregó un poco perdiendo parcialmente la forma, como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Prueba del cono para confirmar que la arena se encontraba en estado SSS.

Una vez presentada la arena en SSS se tomó una muestra, a continuación, se llenó un matraz con agua, se registró su peso y se extrajo el agua. Posteriormente, se introdujo la arena en el matraz, para posteriormente echarle agua hasta la marca de aforo y pesarlo en la báscula. El proceso se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Matraz con agregado fino y agua para ensayo de densidad en arenas.

Con los datos obtenidos se realiza la siguiente Ecuación 2:

$$D_{ASSS} = \frac{M_{ASSS}}{M_{pa} + M_{ASSS} - M_{pma}} \quad (2)$$

Donde:

D_{ASSS} = Densidad en condición de saturada y superficialmente seca (adimensional).

M_{pa} = Masa del matraz con agua hasta la marca de aforo (g).

M_{ASSS} = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca (g).
 M_{pma} = Masa del matraz, muestra y agua hasta la marca de aforo (g).

3.2.3.2 Determinación de la densidad de la grava

El equipo utilizado fue bascula, franelas, recipiente con agua y una canastilla. Inicialmente, se saturó en agua el material por 24 horas, siguiente a eso, se preparó la grava para llegar a su condición SSS, tomando diferentes tamaños de agregado grueso, los cuales se fueron secando con una franela hasta obtener una muestra de 400 g. El material se depositó en una canastilla que sumergía en el agua y estaba colgada del eje de la balanza, de esta manera se obtiene la masa de la grava en su condición sumergida en agua. A los 400 g de grava en condición SSS, se restó la masa de la grava en su condición sumergida en agua, para finalmente tomar el valor obtenido y dividirlo entre los 400 g. Así se obtiene el valor de densidad de la grava.

Con los datos obtenidos se realiza la siguiente Ecuación 3:

$$D_{GSSS} = \frac{M_{GSSS} - M_{Gs}}{M_{GSSS}} \quad (3)$$

Donde:

D_{GSSS} = Densidad en condición de saturada y superficialmente seca (adimensional).

M_{Gs} = Masa de la grava en su condición saturada (g).

M_{GSSS} = Masa de la grava en su condición SSS (g).

En la Figura 11, se ilustran imágenes del procedimiento.



Figura 11. Grava saturada en agua, secado de grava para su estado SSS, balanza para prueba de densidad a gravas.

3.2.4 Determinación de la densidad del caucho

Fue importante conocer la densidad del caucho, ya que es un dato necesario para conocer la cantidad de caucho que iba a reemplazar al agregado fino en la mezcla de diseño, basado en su volumen. El equipo a utilizar fue una probeta, un objeto de diseño, basado en su volumen. El equipo a utilizar fue una probeta, un objeto que tuviera la medida exacta de la boquilla de la probeta y un embudo.

Inicialmente, se llenó la probeta de agua, luego se introdujo un objeto dentro de la probeta hasta que fuera cubierto completamente de agua y se tomó lectura del volumen de agua desplazado por el objeto. Siguiendo a eso, se sacó el objeto y se introdujo una cantidad de masa conocida de caucho. Como el caucho quedó flotando en el agua, se introdujo de nuevo el objeto y se procedió a deslizarlo por la probeta hasta empujar y sumergirse junto con el caucho en el agua. Finalmente se tomó lectura del desplazamiento del agua. Realizando las diferencias de volúmenes entre el volumen del objeto y del objeto junto con el caucho dentro del agua, se conoció el volumen del caucho dentro del agua. En la Figura 12, se muestra el procedimiento descrito.



Figura 12. Prueba para conocer densidad del caucho.

Finalmente, se realizó la Ecuación 4 de densidad:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4)$$

Donde:

ρ = Densidad del caucho (adimensional).

m = Masa de la muestra del caucho (g).

v = Volumen de la muestra del caucho (g).

3.2.5 Determinación de la densidad del cemento y metacaolín

Se realizó la prueba de densidad al cemento y al MK, como método para verificar que el dato proporcionado por el proveedor fuera correcto. El procedimiento se basó en la norma NMX-C-152-ONNCCE. El equipo utilizado fue una báscula, un matraz Le Chatelier y una bandeja con agua a temperatura ambiente. Se inició llenando de gasolina un matraz Le Chatelier hasta la marca de graduación entre cero y uno y se sumergió en agua con temperatura controlada por 30 minutos, transcurrido este tiempo se tomó la lectura del volumen inicial. A continuación, se introdujo el cemento en el matraz se expulsó el aire atrapado y se sumergió en agua con temperatura controlada. Se realizó la lectura final cuando el matraz alcanzó una temperatura constante (Figura 13).

Finalmente, se realizó la Ecuación 5:

$$\rho = \frac{mc}{Vf - Vi} \quad (5)$$

Donde:

P = Densidad (g/cm^3).

m_c = Masa de la muestra de cementante (g).

V_i = Volumen inicial de la gasolina introducido al frasco (cm^3).

V_f = Volumen final de la gasolina (después de introducir el cementante) (cm^3).



Figura 13. Prueba de densidad a MK y cemento

3.2.6 Determinación de la absorción del agregado

Esta prueba se realizó bajo la norma mexicana NMX-C-164-ONNCCE y NMX-C-165-ONNCCE. Se utilizaron charolas, báscula y horno con una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. El procedimiento fue el mismo tanto para arenas como para la grava. Inicialmente, se tomó una muestra de cada material en su condición SSS, conociendo su masa, se secó en el horno a una temperatura de $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$. Pasadas 24 horas, se tomó la muestra del horno y se obtuvo la masa seca del material. Finalmente, se utilizó la Ecuación 6 respectiva para calcular la absorción.

$$A = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} * 100 \quad (6)$$

Donde:

A= Absorción (%).

M_{SSS} = Masa de la muestra en su condición SSS (g).

M_s = Masa de la muestra seca (g).

3.3 Elaboración de mortero con caucho y metacaolín

Para conocer los efectos que el MK y el caucho en la mezcla tendrían, se realizaron mezclas de mortero los cuales contenían distintos porcentajes de dichos materiales, como se muestra en la Tabla 5. Lo anterior fue fundamental para seleccionar las proporciones de reemplazo para posteriores diseños de mezclas de concreto. Para la elaboración y caracterización de los morteros se utilizaron moldes cúbicos, cinta métrica, equipo de fluidez (mesa, cono, pisón), mezclador mecánico, aceite mineral y probetas.

Tabla 5. Porcentajes de remplazo de MK y caucho en mezclas de mortero.

Mezcla de mortero	MK (%)	Caucho (%)
Mezcla control (M_c)	0	0
M_{15-7}	15	7
$M_{15-8.5}$	15	8.5
M_{15-10}	15	10
M_{17-7}	17	7
M_{20-7}	20	7
M_{15-0}	15	0
M_{0-7}	0	7

3.3.1 Elaboración de mezcla de mortero

Con base a la norma NMX-C-085-ONNCCE, se inició asegurando que la olla y la paleta estaban secas y limpias antes de colocarlas en la mezcladora. Primero, se vertió el agua y cemento dentro de la olla y se reposó 30 segundos. Después, se agregó gradualmente la arena mientras la mezcladora trabajaba a baja velocidad durante 30 segundos. Luego, se comenzó a mezclar a alta velocidad durante 30 segundos, para luego permitir que la mezcla reposará durante 90 segundos.

Durante este tiempo, se desprendió el material adherido a las paredes y al fondo de la olla. Inmediatamente después, se cubrió la olla con un paño húmedo hasta que se cumpliera el tiempo marcado (90 segundos). Se finalizó con el accionar de la mezcladora a alta velocidad durante un minuto.

3.3.2 Prueba de fluidez al mortero

Con base en la norma NMX-C-061-ONNCCE, se inició humedeciendo la mesa de fluidez y el cono truncado. Se colocó el cono en el centro de la mesa y se llenó en dos capas, se compactó con 20 golpes en cada una con ayuda del pisón. Se enrasó y se procedió a limpiar la superficie para luego retirar el molde. Inmediatamente después, se dejó caer la mesa 25 veces durante 15 segundos. Se midieron cuatro diámetros diferentes y se realizó la siguiente Ecuación 7 para calcular el porcentaje de aumento. El procedimiento se muestra en la Figura 14.

$$\% \text{ Fluides } = \frac{D_p - D_a}{D_a} * 100 \quad (7)$$

Donde:

D_p = Diámetro promedio medido (cm).

D_a = Diámetro del anillo (cm).



Figura 14. Mesa de fluidez.

3.3.3 Fabricación y curado de cubos de mortero de 5x5x5 cm

Se llenaron los compartimentos del molde de los especímenes (Figura 15) a dos capas de mortero. Cada capa se compactó 32 veces en 10 segundos, en 2 vueltas. Una vez terminada la superficie, se niveló y se dejó reposar en el molde durante 24 horas antes de desmoldarlos, dicho proceso siguiendo la norma NMX-C-061-ONNCCE. El proceso de curado se llevó a cabo siguiendo la norma mexicana NMX-C-159-ONNCCE. Para el curado de los especímenes de mortero, se sumergieron en un baño de agua saturada con hidróxido de calcio a una temperatura controlada.



Figura 15. Moldes para cubos de mortero de 5x5x5 cm.

3.4 Elaboración de concreto con caucho y metacaolín

Se realizaron mezclas de concreto con base en el método del ACI 211.11-81 que fue traducido y revisado por el instituto mexicano del cemento y del concreto en su edición de 1990, IMCYC. Para esto se necesitaron datos previos como son análisis granulométricos de los agregados, masa volumétrica y absorción de los agregados, densidad del cemento, tipo de estructura, medio ambiente y resistencia a la compresión a los 28 días.

3.4.1 Elaboración de mezcla de concreto

Para el procedimiento se inició eligiendo un revenimiento y un tamaño máximo del agregado, luego se realizó el cálculo del agua de mezclado y contenido de aire. Se procedió a calcular la cantidad de cemento, agregado grueso y fino con base a los volúmenes de los materiales, se realizó ajuste por humedad de agregado y finalmente se calculó la cantidad de reemplazo del caucho por arena y de MK por cemento.

Para el mezclado, se inició con la preparación de un mortero (cemento y agua) para cubrir las paredes de la revolvedora, este mortero que se adhirió a la revolvedora después de la descarga, compensa la pérdida de mortero en la revoltura de prueba. Primeramente, se añadió la grava y parte del agua, se inició la operación de la revolvedora y se añadió la arena, cemento y resto de agua de mezcla. Se mezcló el concreto durante 3 minutos, después de colocar todos los materiales, seguido de un descanso de 3 minutos; se terminó con otro periodo de mezclado de 2 minutos. Se tapó la boca de la revolvedora con un paño húmedo durante el periodo de descanso para evitar la evaporación.

3.4.2 Prueba de revenimiento al concreto

Con base en la norma NMX-C156-ONNCCE se establecieron los lineamientos para realizar la prueba de revenimiento del concreto fresco y determinar su consistencia, se utilizaron: un molde metálico, troncocónico, abierto por ambos extremos, con un diámetro superior de 10 cm. e inferior de 20 cm, una varilla punta de bala, una placa de apoyo de 40 x 40 cm y un cucharón. Algunos equipos se muestran en la Figura 16.

Se inició humedeciendo todo el equipo a utilizar, para evitar que se perdiera agua de la mezcla. Luego, se procedió llenando el cono en 3 capas, compactando cada capa con 25 golpes, se enrasó y se retiró el cono alzando el molde verticalmente en 5 segundos. Finalmente, se midió el asentamiento determinando la diferencia vertical entre el borde superior del molde y la posición desplazada del centro original de la superficie superior del espécimen.



Figura 16. Equipo para prueba de revenimiento.

3.4.3 Masa volumétrica del concreto

Se realizó la masa volumétrica del concreto con base a la norma NMX-C-162-ONNCCE. El equipo utilizado fue una balanza, una varilla compactadora, una placa de enrasado, un mazo, una pala y un contenedor cilíndrico metálico. Se inició humedeciendo el equipo a utilizar, se procedió llenando el molde en tres capas, compactando cada capa con 25 golpes. Luego de que cada capa se compactó por varillado, se golpeó los costados 12 veces con el mazo con una fuerza tal que para cerrar cualquier hueco dejado por la varilla compactadora y para liberar todas las burbujas de aire. Finalmente, se enrasó con la plaza, se limpió el exceso y se pesó.

3.4.4 Elaboración de especímenes de concreto para ensaye

Los insumos utilizados para la elaboración de los especímenes fueron moldes de cilindros y vigas, cucharón, varilla, enrasadora y marro. Se prepararon moldes de cilindros de 30 x 15 cm (Figura 17), cilindros de 20 x 10 cm y moldes de vigas de 6x6x28 cm cubriendo de aceite los moldes. Se inició colocando el concreto en el molde con el número de capas requeridas de aproximadamente igual volumen. Se golpeó cada capa uniformemente sobre la sección transversal con el extremo

redondeado de la varilla utilizando el número de golpes requerido. Después de que cada capa fue varillada, se golpeó los lados exteriores del molde levemente 10 a 15 veces con un mazo, para cerrar cualquier hueco que haya quedado con el varillado y liberar toda burbuja grande de aire que haya podido quedar atrapada. Después de golpear, se enrasó. Pasado 24 horas, se desmoldaron los especímenes, se marcaron para su identificación y se introdujeron en el cuarto de curado.



Figura 17. Moldes para cilindros de 15X30 cm.

3.5 Pruebas mecánicas en laboratorio

3.5.1 Determinación de la resistencia a compresión del concreto

Se realizó con base en la norma NMX-C-083-ONNCCE, el equipo utilizado fue prensa universal y cinta métrica. En este ensaye se inició retirando los especímenes de la tina de curado, se tomaron sus dimensiones (altura, diámetro) y se pesaron. Se colocó el espécimen en la prensa y se le aplicó carga hasta su falla.

3.5.2 Ensaye a flexión en vigas de concreto

En este caso, es importante conocer la resistencia a la flexión, ya que los agrietamientos se deben a este tipo de esfuerzo. La prueba de resistencia del concreto a flexión se emplea para el control de calidad en la construcción de pavimentos rígidos de concreto hidráulico. La prueba se realizó con base en la norma NMX-C-191-ONNCCE, los equipos utilizados fueron tiras de cuero de un espesor uniforme de 5 mm a 7 mm, escuadra, regla, lija de agua, máquina de prueba, dispositivo de aplicación de carga. Se inició tomando las medidas de la viga

y marcando en la viga donde irán los apoyos inferiores y centro del claro donde se aplicará la carga. Se acomoda la viga y se comienza a aplicar carga hasta su falla.

3.5.3 Módulo de elasticidad en cilindros de concreto

Se llevó a cabo la medición del diámetro y la longitud de un cilindro de concreto. Se colocó al espécimen de prueba el dispositivo de medición y se ajustó el dial para registrar la deformación. Luego, se colocó el espécimen en la máquina de ensayo y se cargó inicialmente para verificar su funcionamiento, se registraron las deformaciones, que pueden tomarse de forma continua para determinar la curva esfuerzo-deformación, o se puede tomar una lectura de carga a las 50 millonésimas de deformación y al llegar al 40% de la resistencia última para encontrar el módulo de elasticidad.

3.5.4 Prueba de impacto a concreto

Se realizó la prueba de impacto sobre dos cubos de concreto ordinario y concreto adicionado con MK y caucho, con el fin de determinar el comportamiento del material sometido a la carga de choque.

Se utilizó un objeto con un peso de 1 kg, y un tubo PVC el cual tenía una medida de 1 metro de largo. Se señaló un área sobre el cubo de concreto, para luego posicionar el tubo de PVC sobre él, se inició soltando el objeto dentro del PVC para que este golpeará en la misma zona al cubo. El objeto se dejó caer repetidas veces, tomando foto del daño, cada 5 golpes, hasta llegar a los 20 golpes, donde ya se percibía un daño sobre el concreto. Se determinó de manera visual cual era el cubo que presentaba mayor daño y se procedió a medir la profundidad del golpe con un vernier.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Ensayos físicos realizados a los materiales

4.1.1 Análisis granulométrico a agregados

A continuación, se muestran los resultados del análisis granulométrico realizado a los agregados para verificar que se encontraban dentro de los límites permisibles de la curva, según indica la norma NMX-C-077-ONNCCE. Todas las pruebas se realizaron por duplicado, obteniendo un promedio de los resultados. En la Tabla 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos para la grava. En la Figura 18, se muestra la curva dentro de los límites granulométricos.

Tabla 6. Límites de granulometría para agregado grueso.

AGREGADO GRUESO - ANÁLISIS DE TAMIZADO			
TAMIZ		LIM. INFERIOR	LIM. SUPERIOR
PULG.	mm		
1"	25	100	100
3/4"	19	90	100
1/2"	12.5	20	55
3/8"	9.5	0	15
No. 4	4.75	0	5

Tabla 7. Resultados del análisis granulométrico de agregado grueso.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE GRAVAS					
PESO DE LA MUESTRA:		8000 g.	ORIGEN:	Culiacán, Sin.	
NORMA:	NMX-C-077-ONNCCE		FECHA:	09/05/2023	
No. Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
1"	25	0.12	1.50	0.00	98
3/4"	19	0.45	5.63	5.63	93
1/2"	12.5	3.3	41.30	46.93	52
3/8"	9.5	3	37.55	84.48	14
No. 4	4.75	1.1	13.77	98.25	0
FONDO	0	0.02	0.25	98.50	0
TOTAL=		7.99			
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL=			1/2"		
TAMAÑO NOMINAL=			3/4"		

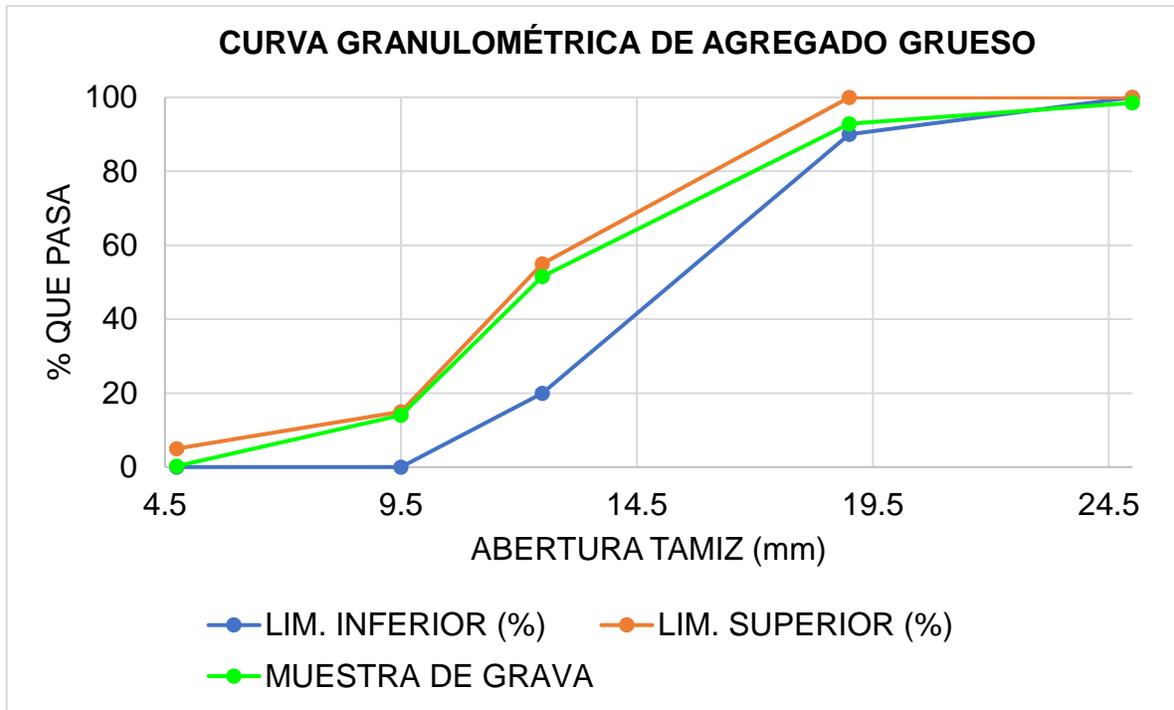


Figura 18. Curva granulométrica para el agregado grueso.

En la Tabla 8 y 9, se muestran los resultados granulométricos obtenidos para la arena. En la Figura 19, se muestra la gráfica de la curva dentro de los límites granulométricos.

Tabla 8. Límites de granulometría para agregado fino.

AGREGADO FINO - ANÁLISIS DE TAMIZADO			
TAMIZ		LIM. INFERIOR (%)	LIM. SUPERIOR (%)
PULG.	mm		
3/8"	9 1/2	100	100
No.4	4 3/4	95	100
No. 8	2 1/3	80	100
No. 16	1 1/6	50	85
No. 30	3/5	25	60
No. 50	2/7	10	30
No. 100	1/7	2	10

Tabla 9. Resultados del análisis granulométrico de agregado fino.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE ARENAS					
PESO DE LA MUESTRA :		500 g.	ORIGEN:	Culiacán, Sin.	
NORMA:	NMX-C-077-ONNCCE		FECHA:	09/05/2023	
No. Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa(%)
3/8"	9.5	0	0	0	100
No.4	4.75	16.65	3.37	3.37	97
No. 8	2.36	41.3	8.36	11.73	88
No. 16	1.18	50.3	10.18	21.92	78
No. 30	0.6	86.9	17.59	39.51	60
No. 50	0.3	209.65	42.44	81.95	18
No. 100	0.15	63.15	12.78	94.74	5
FONDO	0	26	5.26	100.00	0
TOTAL=		493.95	100		
MÓDULO DE FINURA=			2.5		

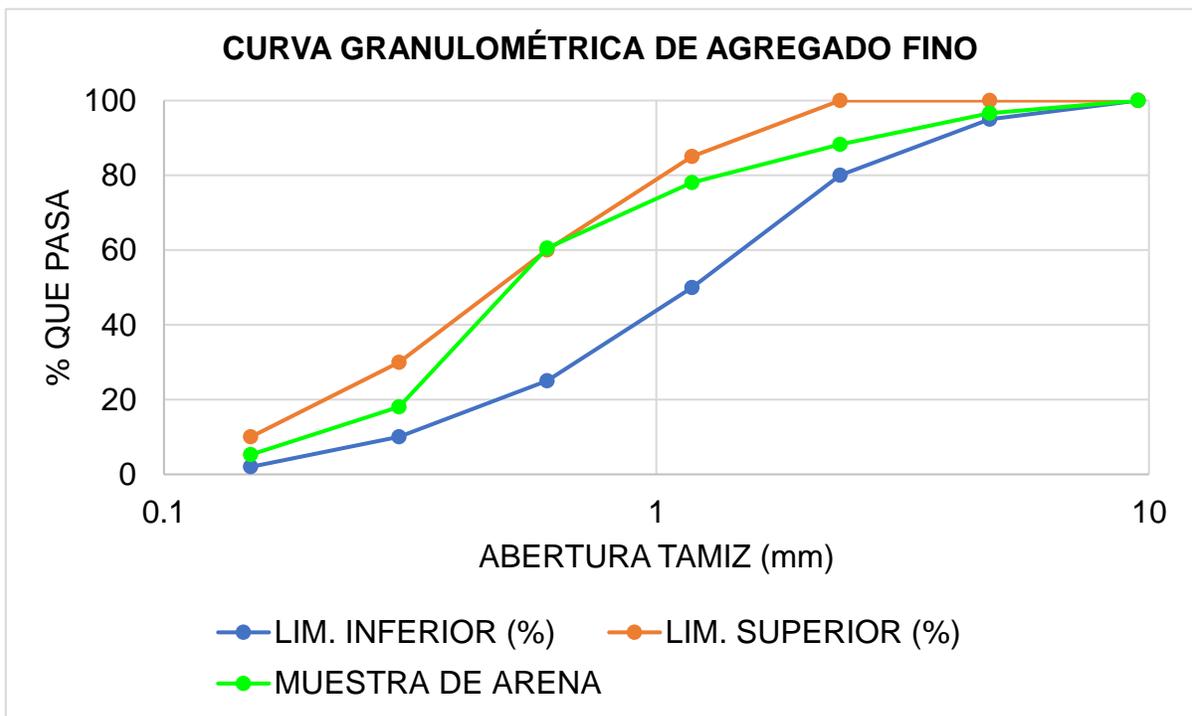


Figura 19. Curva granulométrica para el agregado fino.

Interpretación de resultados:

En las curvas granulométricas se observa que el agregado grueso y el agregado fino se encuentran dentro de los límites que indica la norma, por lo que son aptos para su uso en las mezclas de mortero y concreto.

Para el caso del agregado fino es necesario asegurarse de que el módulo de finura (M.F.) esté en el rango adecuado, que va desde 2.3 hasta 3.1, según lo establecido en la norma antes mencionada. Con los resultados se observa que el valor del módulo de finura cumple con estos límites.

4.1.2 Densidad de los materiales

El dato de la densidad de los materiales utilizados en las mezclas de concreto y mortero fue muy importante, debido a que fue necesario para realizar el cálculo de la sustitución por volumen del caucho por arena y, MK por cemento. Además, la densidad se requirió al momento de calcular la dosificación del concreto mediante el método ACI 211.

Para el caso de la mezcla de mortero, se tamizó por la malla 16" de acuerdo al procedimiento de mezclado de pastas.

El caucho como reemplazo de arena en las mezclas, se observó, que presenta partículas alargadas y amorfas, por lo que se cribó en distintos tamaños de malla y se revisó cual podría ser la medida óptima para que no afectara la mezcla, buscando reducir el tamaño de las partículas del caucho a un tamaño de partícula similar al de arena. Se tomó la decisión de utilizar caucho cribado por la malla 8" para las mezclas de concreto, y para las mezclas de mortero se utilizó caucho cribado por la malla 16". En la Tabla 10, se muestra un resumen de los datos obtenidos para las densidades de las arenas, y en la Tabla 11, los resultados para la grava. Todos los ensayos se realizaron por duplicado para cada material y se obtuvo un promedio.

Tabla 10. Densidad de la arena.

DENSIDAD DE ARENAS				
PESO DE LA MUESTRA:	250 g.			
NORMA:	NMX-C-164-ONNCCE			
ORIGEN:	Culiacán, Sin.			
FECHA:	09/05/2023			
	Arena para concreto		Arena para mortero	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Masa muestra SSS (g)	250	250	250	250
Masa matraz con agua (g)	682.2	682.5	669.1	669
Masa del matraz con agua y arena, muestra hasta la marca de aforo (g)	835.6	834.7	820.9	820
Densidad (adimensional)	2.59	2.56	2.55	2.53
PROMEDIO	2.57		2.54	

Tabla 11. Densidad de la grava.

DENSIDAD DE GRAVA		
PESO DE LA MUESTRA:	400 g	
NORMA:	NMX-C-164-ONNCCE	
ORIGEN:	Culiacán, Sin.	
FECHA:	09/05/2023	
	Grava	
	Muestra 1	Muestra 2
Masa muestra grava SSS (g)	400	400
Masa muestra grava sumergida (g)	258	259
Masa grava SSS – Masa grava sumergida (g)	142	141
Densidad (adimensional)	2.82	2.84
PROMEDIO	2.83	

A continuación, se presentan los resultados de la densidad del caucho (Tabla 12).

Tabla 12. Densidad del caucho.

DENSIDAD DEL CAUCHO				
ORIGEN:	Culiacán, Sin.			
FECHA:	11/05/2023			
	Caucho para concreto		Caucho para mortero	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Probeta con agua (cm ³)	50	50	50	50
Probeta con agua y objeto (cm ³)	64	63	61	62
Peso del caucho (g)	8.6	8.6	8	8
Probeta con agua y caucho (cm ³)	74	73	73	74
Vol. Caucho (cm ³)	10	10	12	12
Densidad (adimensional)	0.86	0.86	0.66	0.66
PROMEDIO	0.86		0.66	

También se analizó la densidad del cemento y MK, y se compararon con la densidad proporcionada en la ficha técnica de ambos productos. Dichos resultados se muestran en las Tablas 13 y 14.

Tabla 13. Densidad del cemento.

DENSIDAD DEL CEMENTO		
PESO DE LA MUESTRA:	60 g	
NORMA:	NMX-C-152-ONNCCE	
ORIGEN:	Culiacán, Sin.	
FECHA:	16/05/2023	
	Cemento	
	Muestra 1	Muestra 2
Lectura inicial (cm ³)	0.5	0.3
Lectura final (cm ³)	19.9	19.8
Peso de la muestra de cemento (g)	60.0	60.0
Volumen (cm ³)	19.4	19.5
Densidad (g/cm ³)	3.09	3.08
PROMEDIO	3.09	

Tabla 14. Densidad del MK.

DENSIDAD DEL METACAOLÍN		
PESO DE LA MUESTRA:	57.10 g	
NORMA:	NMX-C-152-ONNCCE	
ORIGEN:	Culiacán, Sin.	
FECHA:	16/05/2023	
	Metacaolín	
	Muestra 1	Muestra 2
Lectura inicial (cm ³)	0.7	0.5
Lectura final (cm ³)	22.0	21.8
Peso de la muestra de MK (g)	57.1	57.1
Volumen (cm ³)	21.3	21.3
Densidad (g/cm ³)	2.68	2.68
PROMEDIO	2.68	

Interpretación de resultados:

La densidad de los agregados puede oscilar en diferentes rangos, dependiendo del tipo de concreto. Para concretos ligeros, la densidad puede variar entre 1.2 y 2.2 g/cm³. En el caso de los concretos normales, el rango es de 2.3 a 2.9 g/cm³. Por otro lado, para concretos pesados, la densidad puede situarse entre 3 y 5 g/cm³ (Cabanillas 2017).

En los agregados empleados la densidad es de 2.54 a 2.83 g/cm³, para el agregado fino y el agregado grueso respectivamente, por lo cual los agregados cumplen con los criterios para un concreto normal.

En el caso del cemento, la ficha técnica indica una densidad de 3.09 g/cm³; en la prueba se obtuvo una densidad similar, por lo que se confirmó la información de la ficha técnica. Para el caso de MK, su ficha técnica indica un rango de 2.65 - 2.68 g/cm³, la prueba indicó un valor de 2.68 g/cm³ por lo que lo posiciona en un valor aceptable.

Se revisa que el caucho presenta una densidad menor, comparada con la densidad de la arena, esto debido a que, cuanto menor sea la masa y mayor el espacio que ocupa, menor será la densidad.

Mismo caso se presenta en el caucho cribado para concreto y mortero, el caucho cribado por la malla 8" usado en concreto, presenta un tamaño de partícula mayor por lo que su densidad se mantiene mayor que el caucho cribado por la malla 16" utilizado en los morteros.

Se observa que el MK y caucho es un material menos denso que el cemento y la arena, por lo que sus efectos en la mezcla lo harán un concreto más ligero.

4.1.3 Masa volumétrica de los agregados

Se realizó la prueba de masa volumétrica suelta y compacta de los agregados utilizados en las mezclas de concreto, dato necesario para el cálculo de la dosificación de la mezcla por el método ACI. En la Tabla 15, se muestran los resultados para la arena cribada por la 3/8", y en la Tabla 16, se muestran los resultados de la grava.

Tabla 15 Masa volumétrica suelta y compacta de la arena

MASA VOLUMÉTRICA DE LA ARENA							
NORMA:		NMX-C-073-ONNCCE					
ORIGEN:		Culiacán, Sin.					
FECHA:		09/05/2023					
Tipo de material	Muestra	Masa molde (kg)	Masa muestra + masa molde (kg)	Masa neto muestra (kg)	Vol. Molde (m³)	MV= m/v (kg/m³)	
						Compacto	Suelto
Arena	1	1.83	6.44	4.61	0.0028	1646	
	2	1.83	6.47	4.64	0.0028	1657	
Arena	1	1.83	6.16	4.33	0.0028		1546
	2	1.83	6.23	4.4	0.0028		1571
PROMEDIO						1652	1559

Tabla 16. Masa volumétrica suelta y compacta de la grava.

MASA VOLUMÉTRICA DE LA GRAVA							
NORMA:		NMX-C-073-ONNCCE					
ORIGEN:		Culiacán, Sin.					
FECHA:		09/05/2023					
Tipo de material	Muestra	Masa molde (kg)	Masa muestra + masa molde (kg)	Masa neto muestra (kg)	Vol. Molde (m ³)	MV= m/v (kg/m ³)	
						Compacto	Suelto
Grava	1	3.42	14.29	10.87	0.007	1553	
	2	3.42	15.01	11.59	0.007	1656	
Grava	1	3.42	14.24	10.82	0.007		1546
	2	3.42	15	11.58	0.007		1654
PROMEDIO						1604	1600

Interpretación de resultados:

La medición de la masa volumétrica de los agregados es necesaria para llevar a cabo un diseño de mezcla adecuado. Además, esta propiedad permite calcular la cantidad de agregados necesarios por metro cúbico (m³) en la mezcla.

Dentro de los rangos aproximados de masas volumétricas de los agregados según el tipo de concreto, se tiene que para un concreto normal el rango se encuentra entre 1,200 a 1,700 kg/m³ (González 2013).

La masa volumétrica suelta y compacta obtenida de los agregados están situados dentro del rango de valores. En la Figura 20, se muestra imágenes del procedimiento.



Figura 20. Procedimiento de la masa volumétrica suelta y compacta.

4.1.4 Absorción de los agregados

Se realizó el cálculo de la absorción de los agregados, dato necesario para la corrección por humedad en la dosificación del concreto. En la Tabla 17 y 18, se muestran los resultados obtenidos de la arena y grava.

Tabla 17. Absorción de la arena.

ABSORCIÓN DE LA ARENA				
NORMA:	NMX-C-165-ONNCCE			
ORIGEN:	Culiacán, Sin.			
FECHA:	11/05/2023			
	Arena para concreto		Arena para mortero	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Masa muestra SSS (g)	200	200	250	250
Masa de la muestra seca (g)	195.5	195.4	242.7	242.3
Absorción (%)	2.30	2.35	3.01	3.18
PROMEDIO	2.3		3.09	

Tabla 18. Absorción de la grava.

ABSORCIÓN DE LA GRAVA		
NORMA:	NMX-C-164-ONNCCE	
ORIGEN:	Culiacán, Sin.	
FECHA:	11/05/2023	
	Grava	
	Muestra 1	Muestra 2
Masa muestra SSS (g)	400	400
Masa de la muestra seca (g)	392.60	392.30
Absorción (%)	1.88	1.96
PROMEDIO	1.92	

Interpretación de resultados:

El porcentaje de absorción de los agregados comúnmente se encuentra en el intervalo de 0.20% - 3.5% (Cabanillas 2017), los agregados estudiados arrojaron resultados de 1.92% para la grava y de 2.3 - 3.09% para la arena, por lo cual se encuentran dentro del rango.

Con base a los resultados de las pruebas de caracterización a los materiales, se confirmó que estos presentaron características aptas para su empleo en las mezclas a estudiar.

4.2 Mortero con caucho y metacaolín

4.2.1 Diseño de mezcla de morteros

Para el estudio del efecto del caucho y MK en distintos porcentajes de reemplazo, se decidió realizar distintas mezclas de mortero. Se realizaron distintas mezclas de mortero con diferentes porcentajes de reemplazo de MK y caucho, y así poder encontrar la combinación de materiales más adecuada para el estudio. La estrategia consistió en analizar la literatura y seleccionar porcentajes ya estudiados, aquellos que se tuvieran un efecto positivo en las resistencias, posteriormente realizar las mezclas con distintos porcentajes de reemplazo de MK y caucho (señalados en la Tabla 5), ensayar las muestras a 7, 14 y 28 días, y llegar a una elección de porcentaje de reemplazo óptimo para crear la mezcla de concreto.

Se mantuvo un solo porcentaje de MK, con distintos porcentajes de caucho para revisar los efectos que provocaba la variación de caucho en las mezclas. De modo similar, en otras muestras, se mantuvo un solo porcentaje de caucho, y se varió la cantidad de MK, para revisar el comportamiento de estas. Se utilizó un cemento Cemex CPC 30 R extra.

El diseño y mezclado se realizó bajo la norma NMX-C-061-ONNCCE, la cual señala la dosificación en una mezcla de mortero para 6 cubos de 5x5x5 cm. Las cantidades de material se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Cantidad de material para 6 cubos de mortero.

Materiales	Caso 1
Núm. De especímenes	6
Cemento	500 g.
Arena graduada	1375 g.
Agua para cemento CPO	242 ml.
Agua para cementos: CPP, CPC. CPEG, CPS, CEG.	La necesaria para dar una fluidez de 110 ± 5

Fuente: (NMX 2015).

Se utilizó un Cemento Portland Compuesto (CPC) por lo que, para conocer la relación agua/cemento ($\frac{a}{c}$), se realizaron mezclas preliminares con distintas cantidades de agua, partiendo de la relación $\frac{a}{c} = 0.49$ como lo indica la norma, hasta poder presentar una fluidez dentro del rango $110 \pm 5\%$. Con esta relación la mezcla se presentó una fluidez muy baja, por lo que se decidió aumentar la relación. El valor óptimo con el cual la mezcla alcanza una fluidez dentro del rango permitido, fue de $\frac{a}{c} = 0.69$. Se manejó una misma relación de $\frac{a}{c}$ para todas las mezclas, para así poder comparar su consistencia y la resistencia a la compresión. En la Tabla 20, se muestran las cantidades utilizadas para la elaboración de morteros.

Tabla 20. Cantidades de material por muestra de mortero.

Muestra	Cemento (g)	Arena (g)	Agua (g)	MK (g)	Caucho (g)
M _c	500	1375	345	0	0
M ₁₅₋₇	435.44	1350.05	345	64.56	24.95
M _{15-8.5}	435.44	1344.7	345	64.56	30.3
M ₁₅₋₁₀	435.44	1339.36	345	64.56	35.64
M ₁₇₋₇	426.83	1350.05	345	74.17	24.95
M ₂₀₋₇	413.92	1350.05	345	86.08	24.95
M ₁₅₋₀	435.44	1375	345	64.56	0
M ₀₋₇	500	1350.05	345	0	24.95

Interpretación de resultados:

De inicio, la norma recomendaba empezar con una relación $\frac{a}{c} = 0.49$, pero al momento que realizar las mezclas se requirió de más agua por lo que la relación subió a $\frac{a}{c} = 0.69$. Las normas brindan valores aproximados, que son recomendables para su uso, sin embargo, estos no se expresan como definitivos, debido a que las características de los materiales en cada región del país son distintas, muchas veces se comportan de manera bastante diferente debido a la forma y textura de las partículas.

Se define, que el agregado presentaba una mayor porosidad por lo que la absorción del agua fue mayor, dejando menos agua libre en la mezcla y haciendo que esta no mantuviera una buena fluidez. Por lo que se añadió más agua, logrando que las partículas absorbieran el agua requerida y dejando la cantidad adecuada de agua libre, mejorando la consistencia de la mezcla. En la Figura 21, se muestra el proceso de mezclado para el mortero.

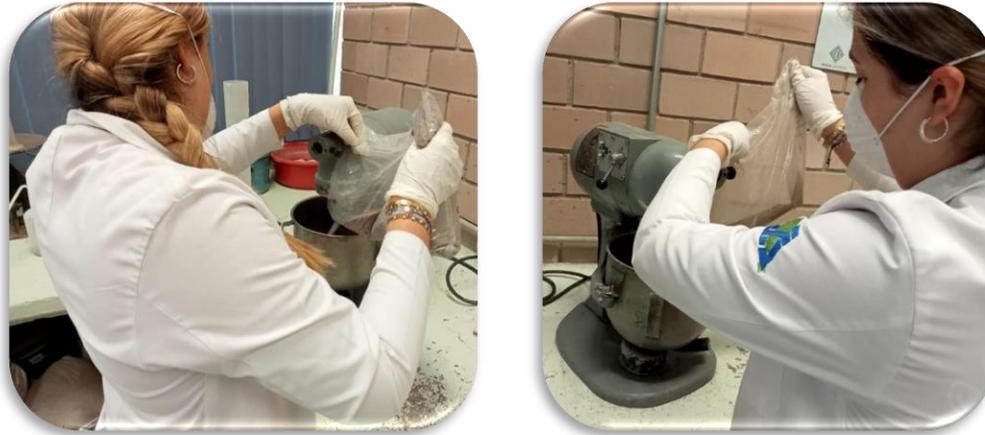


Figura 21. Proceso de mezclado para mortero.

4.2.2. Fluides en las mezclas de mortero

A continuación, en la Tabla 21, se presentan los resultados de la prueba de fluides de las distintas mezclas de mortero.

Tabla 21. Porcentajes de fluides en mezclas de mortero.

Muestra	Fluides (%)
M _c	115
M ₁₅₋₇	86.6
M _{15-8.5}	90.8
M ₁₅₋₁₀	96.8
M ₁₇₋₇	98.0
M ₂₀₋₇	99.8
M ₁₅₋₀	97.3
M ₀₋₇	No aplicó

Interpretación de resultados:

Para la muestra control (M_c), se logró cumplir con el porcentaje de fluides recomendado por la norma. Con base a esa relación agua-cemento, se trabajó con las demás mezclas de mortero. Se observa que para las mezclas donde la cantidad de caucho está en aumento (M₁₅₋₇, M_{15-8.5}, M₁₅₋₁₀), el valor de fluides también lo está, esto debido a que el caucho tiene un porcentaje de absorción bajo, por lo que no

está absorbiendo agua, agua que estaría siendo absorbida por la arena que se le retiro por el remplazo de caucho, quedando mayor cantidad de agua libre. En el caso de la mezcla donde la cantidad de MK es mayor (M_{15-0}), se observa el porcentaje de fluidez disminuye. Esto debido a que el MK, trabajando como un cementante, si absorbe mayor cantidad de agua, quedando menos agua libre en la mezcla.

Para el caso de la muestra M_{0-7} , donde solo contenía 7% de caucho, la mezcla resultó muy fluida, siendo imposible realizar la prueba de fluidez ya que esta se derramaba del disco de ensayo. Para las demás muestras (M_{15-7} a la M_{20-7}), las cuales también contenían caucho, pero además MK, se define que el MK tomó parte del agua, dejando menos porcentaje de agua libre, logrando mantener un porcentaje de fluidez cercano al optimo; caso contrario, en la muestra M_{0-7} donde no hubo cantidad de MK en la mezcla, solo caucho. En la Figura 22, se muestra el procedimiento para el cálculo de fluidez.



Figura 22. Proceso de la prueba de fluidez.

4.2.3. Masa volumétrica de los morteros

A continuación, en la Tabla 22, se muestran los resultados a la prueba de masa volumétrica en los distintos morteros realizados.

Tabla 22. Masa volumétrica de los morteros.

Muestra	MK (%)	Caucho (%)	Masa molde (kg)	Masa muestra + masa molde (kg)	Masa neto muestra (kg)	Vol. Molde (m ³)	MV= m/v (kg/m ³)
M _c	0	0	0.039	0.3279	0.2889	0.000131	2205
M ₁₅₋₇	15	7	0.039	0.3231	0.2841	0.000131	2169
M _{15-8.5}	15	8.5	0.039	0.3221	0.2831	0.000131	2161
M ₁₅₋₁₀	15	10	0.039	0.322	0.283	0.000131	2160
M ₁₇₋₇	17	7	0.039	0.3256	0.2866	0.000131	2188
M ₂₀₋₇	20	7	0.039	0.3232	0.2842	0.000131	2169
M ₁₅₋₀	15	0	0.039	0.327	0.288	0.000131	2198
M ₀₋₇	No aplicó						

Interpretación de resultados:

Con base a los resultados, se observa que el mortero con mayor cantidad de caucho, se presenta como un mortero más ligero. Mismo caso para el mortero con mayor porcentaje de MK. Esto debido a que el caucho presenta una densidad menor que la arena, y el MK una densidad menor que el cemento.

Se observa que, en comparación con la masa volumétrica de la M_c, la M₁₅₋₇ se redujo un 1.66%, la M_{15-8.5} un 2%, la M₁₅₋₁₀ un 2.04%, la M₁₇₋₇ un 0.80%, la M₂₀₋₇ un 1.62% y la M₁₅₋₀ un 0.311%.

El caucho es un material ligero, por lo que en las muestras M₁₅₋₇ a la M₁₅₋₁₀ donde se proporciona un aumento en el porcentaje de caucho, estas van presentando menor masa volumétrica. En cambio, las mezclas M₁₇₋₇ y M₂₀₋₇ donde el porcentaje de MK va en aumento, se observa que su masa volumétrica desciende, esto debido a que el MK es menos denso que el cemento, por lo que la mezcla M₁₇₋₇, donde se tiene una mayor cantidad de cemento, se presenta una mayor masa volumétrica.

4.2.4. Ensaye a la compresión de los morteros

Se le realizó ensaye a la compresión a los cubos antes mencionados a los 7,14 y 28 días, los resultados se muestran en las Figuras 23 y Figura 24.

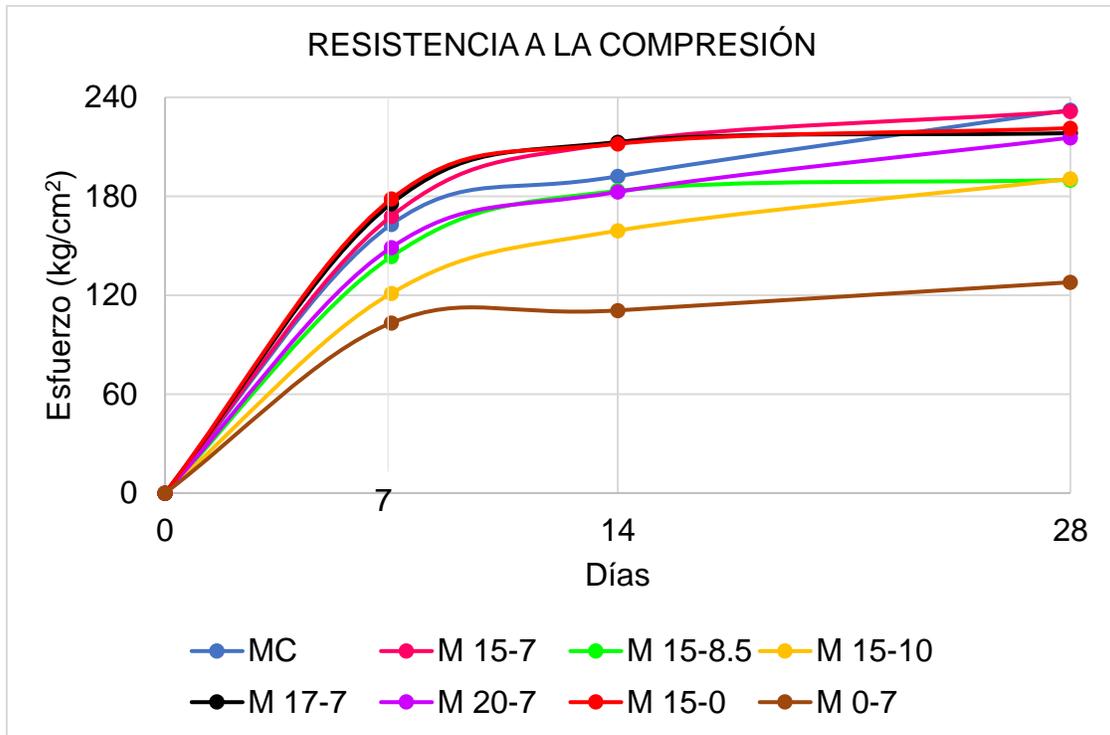


Figura 23. Comparación de esfuerzos a 28 días en morteros con distintos porcentajes de sustitución de MK y caucho.

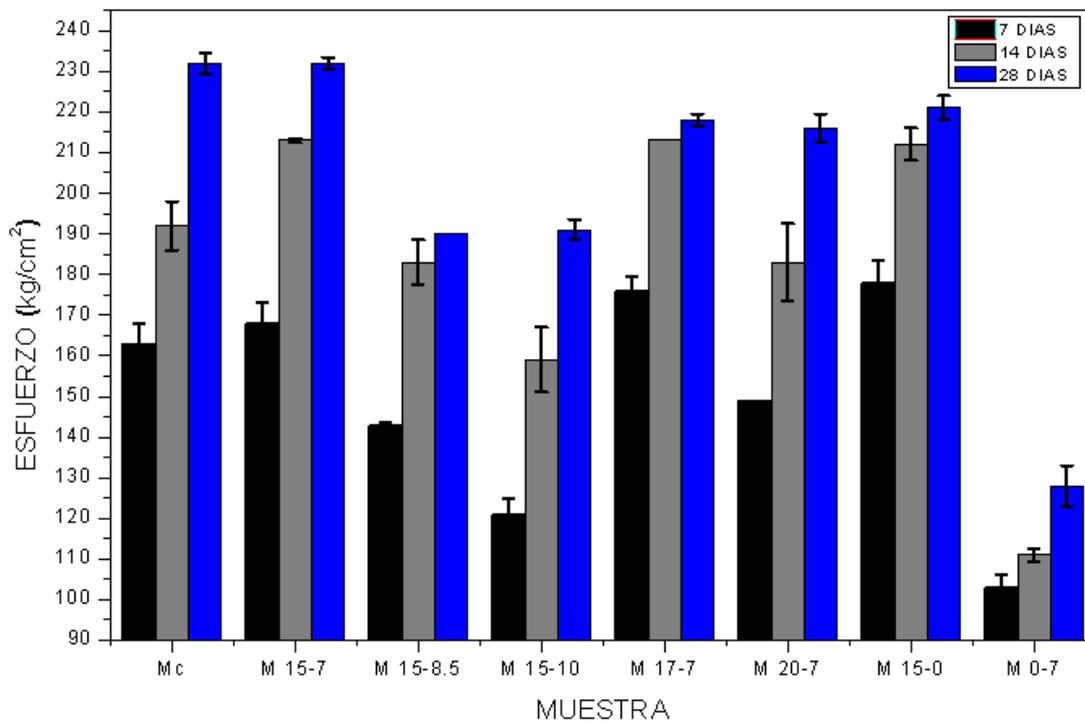


Figura 24. Incrementos de esfuerzos a 7, 14, 28 días en morteros con distintos porcentajes de sustitución de MK y caucho.

Interpretación de resultados:

Con base en los resultados obtenidos de las pruebas de compresión, se observa que a los 7 días la mezcla con mayor esfuerzo alcanzado con 176 kg/cm^2 , fue la M_{17-7} , la cual contiene 17% de MK y 7% de caucho. De ahí le sigue la M_{15-7} , la cual alcanzó 168 kg/cm^2 la cual contiene un reemplazo de 15% de MK y 7% de caucho.

En comparación con la M_c , se observa que existió un decremento en la resistencia a los 7 días, del 12% para la $M_{15-8.5}$, un 25.65% para la muestra M_{15-10} , un 8.59% para la M_{20-7} y un 36.7% para la M_{0-7} . En caso contrario, se tiene un incremento en la resistencia en comparación con la M_c , de 3% para M_{15-7} , 7.73% para M_{17-7} y 8.16% para M_{15-0} .

A los 14 días, se mantiene con mayor resistencia la muestra M_{17-7} , de igual modo la M_{15-7} logra resistencias similares, ambas alcanzando los 213 kg/cm^2 .

En comparación con la M_c , se observa que existió un decremento en la resistencia a 14 días, del 4.61% para la $M_{15-8.5}$, un 17.17% para la muestra M_{15-10} , un 4.93% para la M_{20-7} y un 42.34% para la M_{0-7} . En caso contrario, se tiene un incremento en la resistencia en comparación con la M_c , de 10.62% para M_{15-7} , 10.79% para M_{17-7} y 10.23% para M_{15-0} .

A los 28 días, la muestra con mayor esfuerzo fue la M_{15-7} , adquiriendo una resistencia similar a la M_c , ambas con 232 kg/cm^2 , luego se tiene la M_{17-7} , con 218 kg/cm^2 . En comparación con la M_c , se observa que existió un decremento en la resistencia a 28 días, de 0.33% para M_{15-7} , 18.25% para $M_{15-8.5}$, 17.97% para M_{15-10} , 6.03% para M_{17-7} , 7.21% para M_{20-7} , 4.74% para M_{15-0} y 44.97% para M_{0-7} .

Con base en esta información, se analiza que, en la muestra M_{15-7} , a los 7 días, el MK aun no reacciona por completo con el hidróxido de calcio libre del proceso de hidratación del cemento, por lo que sus resistencias eran menores a la muestra M_{17-7} . Ya a los 14 días, existe una mayor reacción del MK con el hidróxido de calcio, por lo que sus esfuerzos en el mortero aumentan, llegándose a nivelar con la muestra M_{17-7} . Finalmente, a los 28 días, la M_{15-7} adquiere una mayor resistencia,

concluyendo que continuaron sus productos de hidratación al contener una mayor cantidad de cemento que el M₁₇₋₇.

Se analiza que el aumento en el porcentaje de caucho, llega a tener efectos descendientes en la resistencia a la compresión, esto debido a que el caucho actúa como un hueco de aire en el concreto, lo que hace que las partículas de caucho accionen como un punto débil en la matriz del concreto, sin embargo, el MK ayuda a que, en presencia de caucho, el concreto siga manteniendo una buena resistencia, pero hasta cierto punto de porcentaje, ya que al aumentar el MK a 20% este presenta un efecto negativo en la resistencia del mortero.

Con base en los resultados de las resistencias de los morteros a 14 días, se llega a la decisión de elegir un porcentaje de reemplazo para realizar el diseño de mezcla de concreto. Teniendo como valores similares, los arrojados por la M₁₅₋₇ y M₁₇₋₇, se selecciona los porcentajes de 17% de MK y 7% de caucho (M₁₇₋₇), y así se obtiene una mezcla con mayor porcentaje de reemplazo de MK, manteniendo buena resistencia a la compresión. En la Figura 25, se muestran algunas muestras de mortero después de la prueba de compresión.

Figura 25. Muestras de mortero con caucho y MK después del ensayo a compresión.



4.3. Concreto con caucho y metacaolín

4.3.1. Diseño de mezcla de concreto

Se realizó el diseño de mezcla de concreto con base en el método del ACI1 211.11-81. Utilizando datos previos a la caracterización de agregados como son: análisis granulométricos de los agregados, densidad y absorción de los agregados, masa volumétrica de los agregados, densidad del cemento, tipo de estructura, medio ambiente, resistencia a la compresión a los 28 días.

Como primer paso se seleccionó un revenimiento, el cual se tomó de las Tablas indicados por el método, según el tipo de construcción, en este caso el pavimento de andadores, el revenimiento recomendado es de 10 cm. El diseño estuvo planeado para una resistencia de 200 kg/cm² por lo que el método recomendó una relación agua-cemento ($\frac{a}{c}$) de 0.7 para la mezcla. Al realizar la mezcla se fue depositando el agua de diseño por partes, ya que el propósito era conseguir un revenimiento de 10 cm adecuado para su aplicación en andadores. Por lo que, se necesitó de menos agua de la planeada para lograrlo, llegando a obtener una relación $\frac{a}{c}$ de 0.5. Para el caso de la mezcla con M_{kc} se indica como relación liquido-cementante, ya que se está incluyendo cemento más MK.

En resumen, se muestran en la Tabla 23 las cantidades empleadas para la mezcla de control de concreto (M_c) y para la mezcla de concreto con MK y caucho (M_{kc}), se utilizó un 17% de remplazo de MK por cemento y un 7% de remplazo de caucho por arena, con base al volumen del material. En la Tabla 24, se muestran las cantidades para 1 m³. En la Figura 26, se muestran imágenes del proceso de mezclado de concretos.

Tabla 23. Cantidades de materiales utilizados en mezclas.

DOSIFICACIÓN REAL EN MEZCLA						
Muestra	Cemento (kg)	MK (kg)	Arena (kg)	Caucho (kg)	Grava (kg)	Agua (kg)
M _c	12	0	35	0	42	4
M _{kc}	10	2	33	1	42	4

Tabla 24. Cantidades de materiales para 1 m³.

DOSIFICACIÓN PARA 1 M ³ DE CONCRETO						
Muestra	Cemento (kg)	MK (kg)	Arena (kg)	Caucho (kg)	Grava (kg)	Agua (kg)
M _c	293	0	801	0	1043	147
M _{kc}	243	43	745	19	1043	143



Figura 26. Proceso de mezcla de concreto.

4.3.2. Prueba de revenimiento en mezclas de concreto

Se realizó prueba de revenimiento a la mezcla control, para cumplir con lo planeado en el diseño. Los resultados se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25. Revenimiento de las mezclas de concreto.

MEZCLA	REVENIMIENTO (cm)
M _c	10
M _{kc}	12.5

Interpretación de resultados:

Se observa como la M_{kc}, muestra un revenimiento mayor, esto debido a que es una mezcla más fluida, debido a la presencia del caucho y MK. Una mezcla será más fluida cuando su cantidad de agua libre sea mayor, por lo tanto, presentará mayor revenimiento. En el caso de las mezclas con materiales de MK y caucho, el volumen

de arena que se está reemplazando por caucho, es significativa para que esta agua no sea absorbida, ya que el caucho presenta mínimos porcentajes de absorción, quedando mayor cantidad de agua libre en la mezcla y por lo tanto aumentando su revenimiento. En la Figura 27, se muestra el proceso del ensayo de revenimiento a la mezcla de concreto.



Figura 27. Procedimiento para prueba de revenimiento al concreto.

4.3.3. Masa volumétrica en mezclas de concreto

En la Tabla 26, se muestran los resultados de la prueba de masa volumétrica a las mezclas de concreto realizadas.

Tabla 26. Masas volumétricas de las mezclas de concreto.

Muestra	Masa molde (kg)	Masa muestra + masa molde (kg)	Masa neto muestra (kg)	Vol. Molde (m ³)	MV= m/v (kg/m ³)
M _c	3.42	19.55	16.13	0.007	2304
M _{kc}	3.42	19.23	15.81	0.007	2259

Interpretación de resultados:

Se observa como la M_{kc}, tiene una masa unitaria 45 kg/m³ (2%) menor que la muestra de control, esto debido a la presencia del caucho y MK, materiales menos densos que el cemento y la arena. Mientras tanto la M_c, presenta una masa volumétrica establecido dentro del rango de un concreto convencional. Se dice que

el concreto estructural de “clase 1” debe tener una masa volumétrica mínima de $2,200 \text{ kg/m}^3$, mientras que para el concreto convencional se especifica una masa volumétrica mínima de $1,900 \text{ kg/m}^3$ en estado fresco (NTC 2017). Por lo tanto, el concreto M_{kc} entra dentro del rango de un concreto apto para su aplicación en andadores, pudiendo incluso llegar a un uso estructural. En la Figura 28, se muestra el proceso de la prueba de masa volumétrica a la mezcla de concreto.



Figura 28. Prueba de masa volumétrica en concreto.

4.3.4. Ensaye a la compresión de los concretos

Se realizaron cilindros de 10X20 cm para el ensaye a compresión a 7 y 28 días. Los resultados se muestran en la Figura 29.

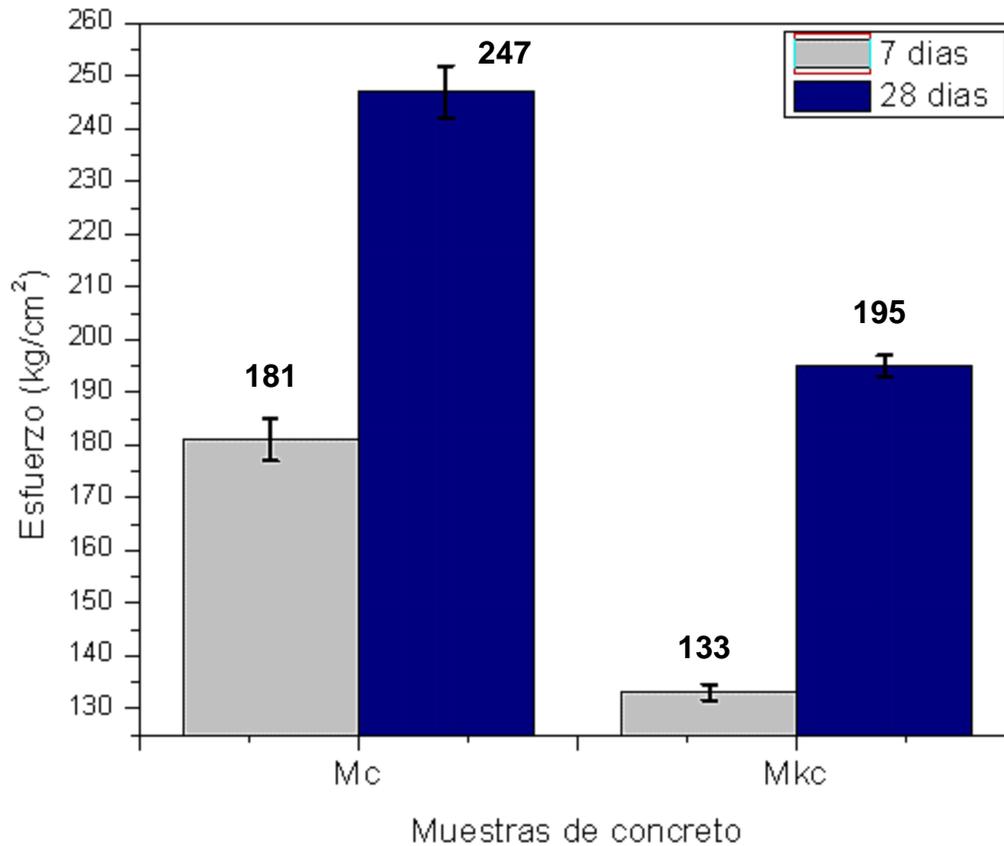


Figura 29. Comparación de esfuerzos a compresión a 7 y 28 días en muestras de concreto.

Interpretación de resultados:

Con base en los resultados obtenidos tras la prueba de ensaye a compresión a 7 días de las muestras de concreto, se observa que la M_c presenta un buen comportamiento de resistencia sobre el diseño planteado de $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$.

A los 7 días, la muestra M_c presenta un 90.5% de resistencia comparada con el $f'_c=200 \text{ kg/cm}^2$ de diseño, mientras que la de muestra M_{kc} de 66.5%. En el caso de la muestra M_{kc} , esta muestra una disminución del 26.51% de la resistencia con respecto a los valores de la muestra M_c .

A los 28 días, la muestra M_c presenta un 123.48% de resistencia comparada con el $f'_c=200 \text{ kg/cm}^2$ de diseño, la cual superó la resistencia planeada debido al cambio en la relación $\left(\frac{a}{c}\right)$ al momento del mezclado del concreto; mientras que la de muestra M_{kc} llegó hasta un 97.39%, brindando valores positivos al objetivo principal de esta investigación y pudiendo ser apta para su correcto empleo en andadores. En el caso de la muestra M_{kc} , esta muestra solo una disminución del 21.13% de la resistencia con respecto a los valores de la muestra M_c .

Se llega a la conclusión de que las partículas de caucho triturado actúan como espacios vacíos dentro del concreto, lo que resulta en una baja resistencia a las cargas. Esto convierte a las áreas ocupadas por estas partículas en puntos débiles dentro de la estructura del concreto. La presencia del MK, brinda un aporte positivo en la fase de hidratación del cemento, contribuyendo con el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas. Por tal motivo la mezcla M_{kc} no presenta un porcentaje tan bajo de decremento en la resistencia, en comparación de la muestra M_c . En la Figura 30, se muestra el proceso del ensayo a compresión.



Figura 30. Prueba de resistencia a la compresión en cilindro de concreto.

4.3.5. Ensayo a la flexión de los concretos

Para realizar dicha prueba, se realizaron vigas de 6x6x18, considerando las medidas mínimas en moldes para ensayo de vigas a flexión con un tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ " indicado en la NMX-C-191-ONNCCE. Se realizaron vigas de

concreto ordinario (V_c), y vigas de concreto adicionado con MK y caucho (V_{kc}). Luego se ensayaron a 7 y 28 días, en la Figura 31 se muestran los resultados.

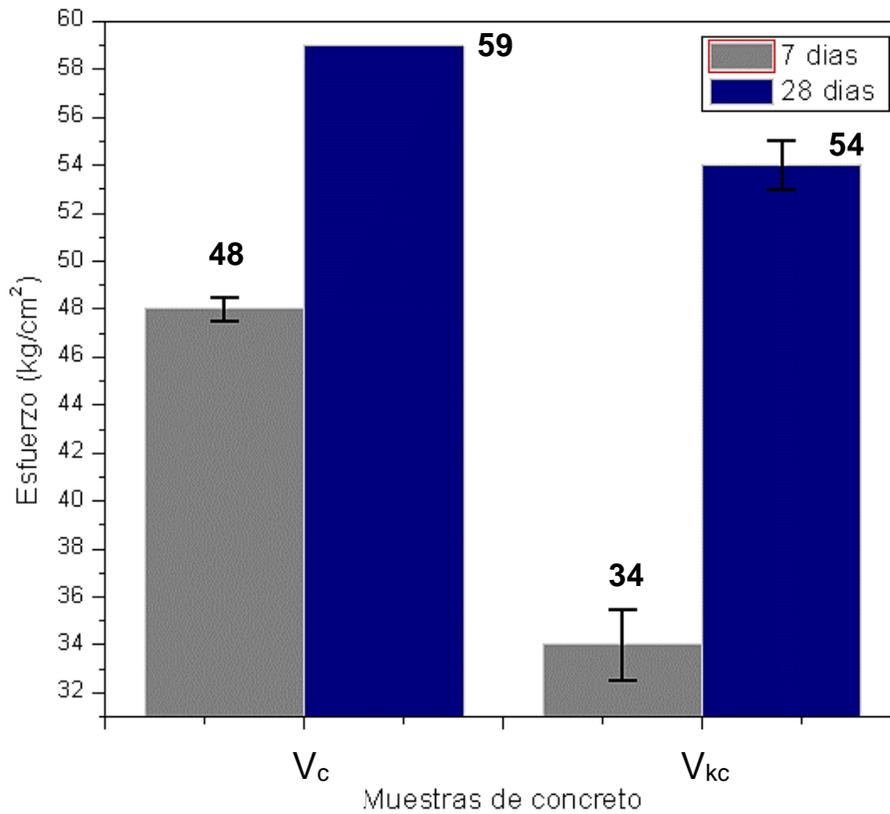


Figura 31. Esfuerzos a flexión a 28 días en muestras de concreto.

En la Figura 32 y 33, se muestra el ensayo a flexión a las vigas de concreto.



Figura 32. Ensayo a flexión de vigas de concreto ordinario.



Figura 33. Fractura en viga de concreto con MK y caucho tras ensayo a flexión.

Interpretación de resultados:

A los 7 días, la muestra V_{kc} muestra una disminución del 29.44% de la resistencia con respecto a los valores de la muestra V_c . A los 28 días, la muestra V_{kc} muestra una disminución del 9.62% de la resistencia con respecto a los valores de la muestra V_c . Con dichos resultados, se observa que, a los 28 días el valor del concreto adicionado con MK y caucho, obtiene valores muy próximos que los del concreto ordinario. Se observa que la fractura en el ensayo de la V_{kc} , no es frágil, sino que exhibe cierta ductilidad, donde la capacidad de carga se mantuvo más tiempo, ya que las piezas no se separan completamente al instante, como se ilustra en la Figura 38. Esto sugiere una capacidad de deformación superior a la que normalmente posee un concreto ordinario.

Con respecto a la información de la Asociación Nacional de Concreto Premezclado (NRMCA 2017), se menciona que teóricamente la resistencia a flexión representa aproximadamente del 10% al 20% de la resistencia a la compresión, dependiendo del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado. Con base a los resultados obtenidos en flexión a 28 días, se tiene un 23% para la V_c con respecto a la resistencia a la compresión. Para el caso de la V_{kc} , se tiene un 27%.

4.3.6. Módulo de elasticidad de los concretos

Se realizaron cilindros de 15X30 cm para la prueba de módulo de elasticidad a 7 y 28 días. Los resultados a 7 días, para la muestra control 1 (M_{c1}) y muestra control 2 (M_{c2}) se muestran en la Figura 34.

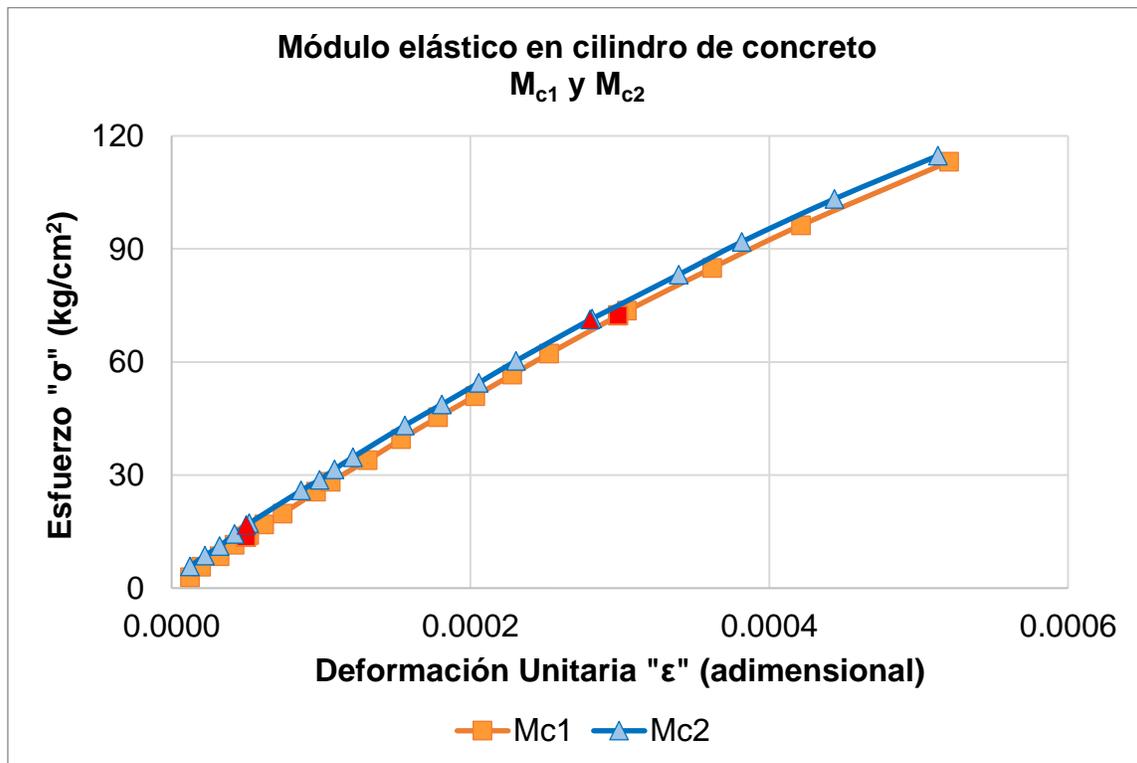


Figura 34. Curva de deformación-esfuerzo a 7 días para mezclas de concreto.

Los resultados a 7 días, para la muestra que contiene metacaolín y caucho 1 (M_{kc1}) y muestra metacaolín y caucho 2 (M_{kc2}) se muestran en la Figura 35.

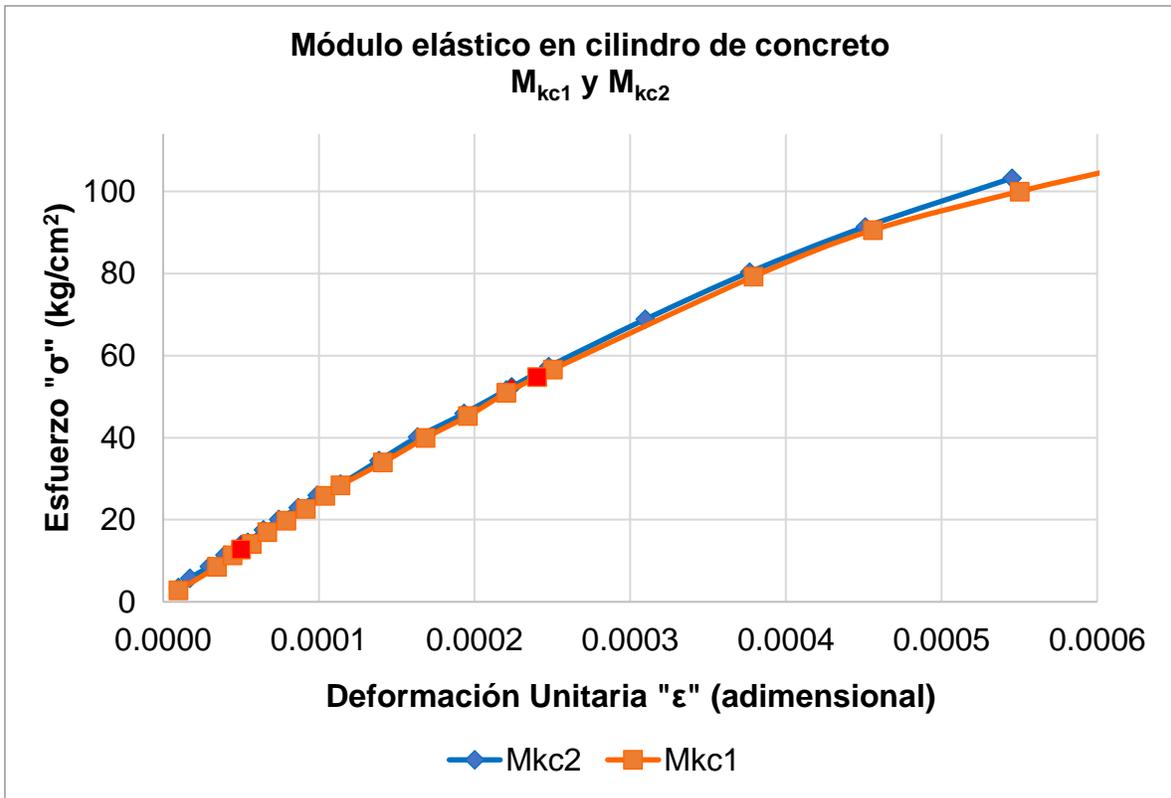


Figura 35. Curva de deformación-esfuerzo a 7 días para mezclas de concreto adicionado con MK y caucho.

El promedio de ambas muestras de control (M_{c1} y M_{c2}) brinda un resultado en modulo elástico de 236,431 kg/cm², y para las muestras adicionadas con MK y caucho (M_{kc1} y M_{kc2}), un valor de 221,080 kg/cm². Los resultados a 28 días, para M_{c3} y M_{c4} , se muestran en la Figura 36. Para M_{kc3} y M_{kc4} se muestran en la Figura 37.

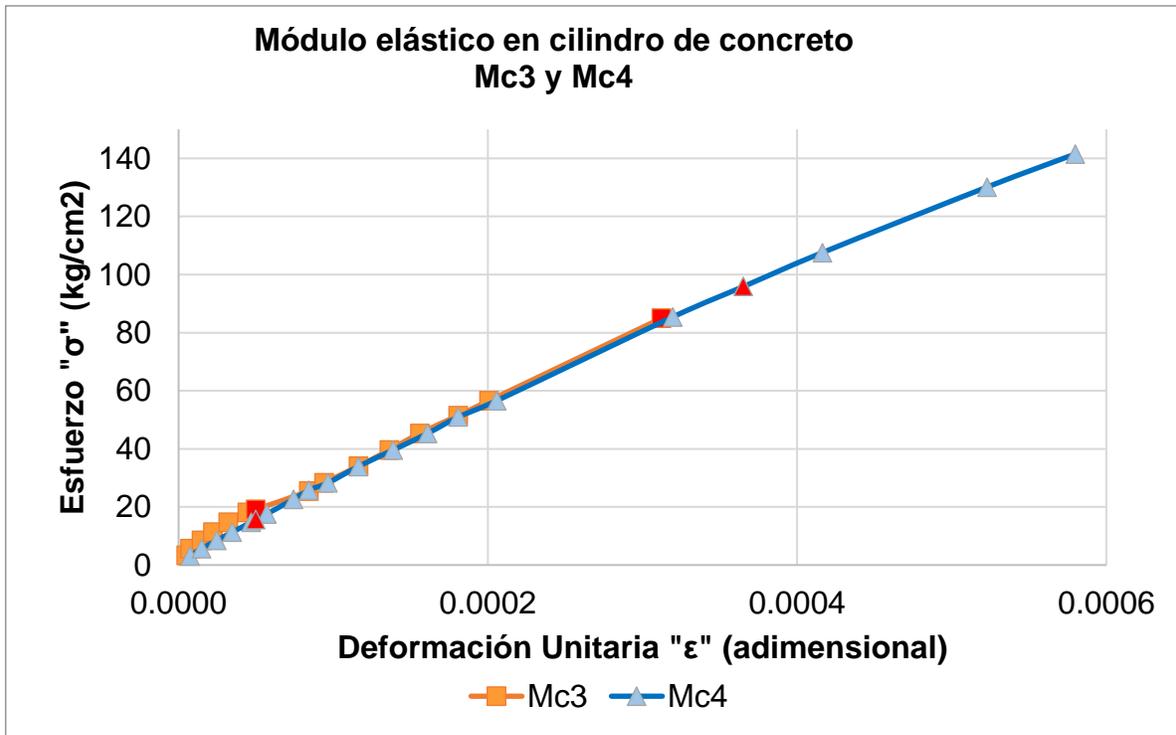


Figura 36. Curva de deformación-esfuerzo a 28 días para mezclas de concreto.

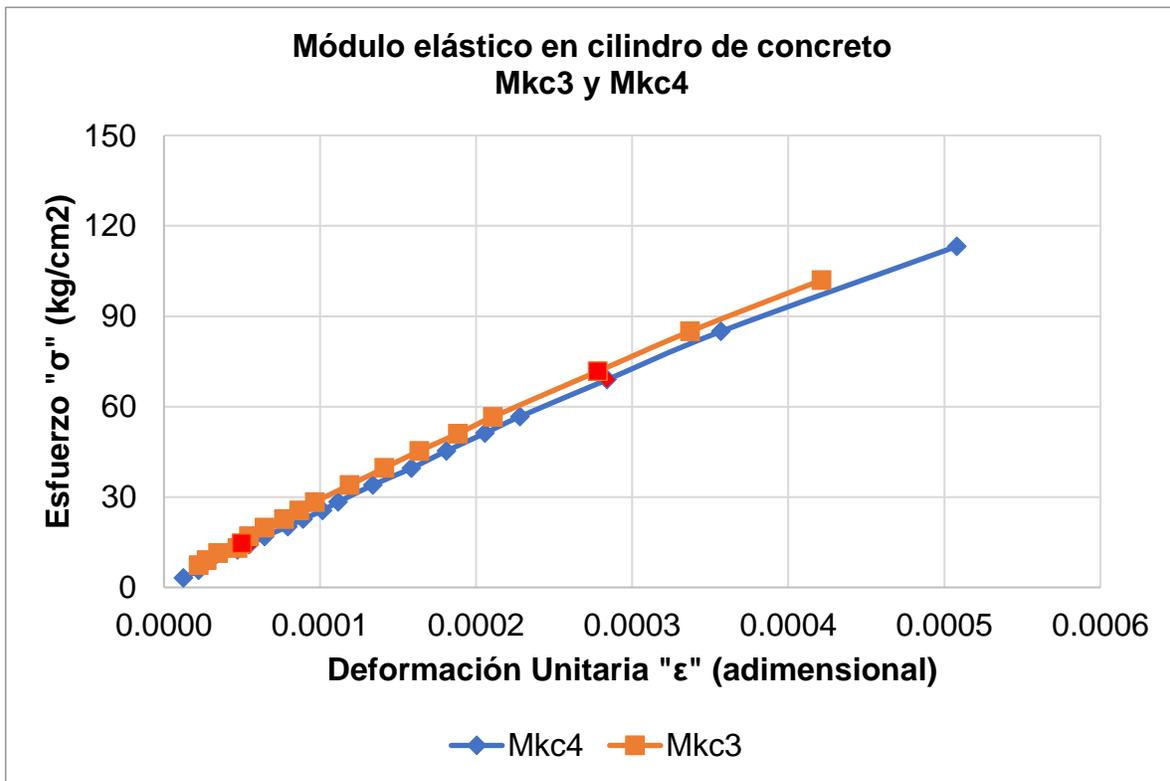


Figura 37. Curva de deformación-esfuerzo a 28 días para mezclas de concreto adicionado con MK y caucho.

El promedio de ambas muestras de control (M_{c3} y M_{c4}) brinda un resultado en modulo elástico de 263,322 kg/cm², y para las muestras adicionadas con MK y caucho (M_{kc3} y M_{kc4}), un resultado de 244,578 kg/cm². En la Tabla 27, se muestra el resumen de los resultados a 7 y 28 días.

Tabla 27. Resultados de la prueba de módulo elástico al concreto.

MEZCLA	MÓDULO ELÁSTICO (kg/cm ²)	
	7 DÍAS	28 DÍAS
M_c	236,431	263,322
M_{kc}	221,080	244,578

Interpretación de resultados:

El módulo de elasticidad es un dato que ayuda a conocer comportamiento mecánico de un concreto en medida de respuesta a la carga que se le esté aplicando. Es un dato que obtuvo para conocer el comportamiento que el concreto tendría ante su aplicación en estructuras. Con base a la fórmula $14,000 * \sqrt{f'c}$ (NTC 2017), se obtiene que el valor óptimo recomendado de módulo elástico con base a las características del concreto sería de $14,000 * \sqrt{200 \text{ kg/cm}^2} = 197,990 \text{ kg/cm}^2$.

A los 7 días, el concreto adicionado con MK y caucho, obtiene un valor de 221,080 kg/cm² en su modulo elástico, resulta un 6.5% inferior al valor que se obtiene en la M_c .

Con base a los resultados, el concreto M_c muestra solo un decremento del 10.35% con respecto al valor de deformación recomendado. En cambio, el concreto M_{kc} presenta un decremento del 10.54%. En la Figura 38, se muestra el proceso de la prueba para la obtención del módulo elástico.



Figura 38. Prueba de módulo elástico en cilindro de concreto.

A los 28 días, el concreto adicionado con MK y caucho, obtiene un valor de 244,578 kg/cm² en su modulo elástico, resulta un 7.11% inferior al valor que se obtiene en la M_c , presentándose, por lo tanto, en valores muy próximos que un concreto ordinario.

Además, M_c muestra un decremento del 21% con respecto al valor óptimo recomendado por la NTC, mientras que el concreto M_{kc} presenta un decremento del 17%.

4.3.7. Prueba de impacto en los concretos.

Se realizó la prueba de impacto mediante ensayos de caída libre de un objeto pesado sobre cubos de concreto ordinario y cubos de concreto adicionado con MK y caucho, el objetivo era revisar como la presencia de caucho afectaba el daño en las grietas y compararlo con el concreto ordinario. Se utilizó un objeto con un peso de 1.20 kg, y se dejó caer a una altura libre de 1 m. en dirección vertical, golpeando siempre en la misma zona. Primero se inicia impactando al concreto ordinario, se dejó caer el objeto 5 veces y se revisaba visualmente el daño, en total fueron 20 golpes.

En la Figura 39, se observa el daño al impacto del concreto ordinario.



Figura 39. Prueba de impacto en concreto ordinario.

En la Figura 40, se observa el daño al impacto del concreto adicionado con MK y caucho.

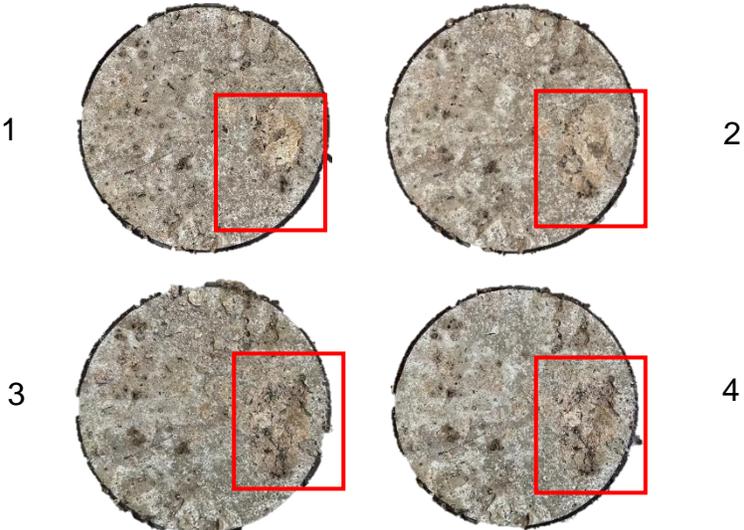


Figura 40. Prueba de impacto en concreto adicionado con MK y caucho.

En la Figura 41, se observa la comparación a 20 golpes en concreto ordinario y concreto adicionado con MK y caucho.



Figura 41. Comparación de daños por impacto en concreto ordinario y concreto adicionado con MK y caucho.

Interpretación de resultados:

Se realizó la medida de la profundidad con el uso de un vernier del daño de cada impacto sobre las muestras de concreto y se obtuvo una profundidad de 10.83 mm para el concreto ordinario y 7.85 mm para el concreto adicionado con MK y caucho, dichos resultados comprueban lo que visualmente brindan las imágenes, donde el daño más prolongado es en el concreto ordinario.

Se entiende, que el caucho tiene un efecto de soporte o colchón, que brinda al momento de dejar caer el objeto pesado, esto da un aporte positivo ya que la presencia de caucho podría brindar una reducción en grietas del concreto.

4.4. Esquema del comportamiento ante esfuerzos del caucho.

Revisando un esquema del comportamiento de esfuerzos de una viga a flexión, se realiza una interpretación del esfuerzo que presenta el caucho ante esta condición de esfuerzos. En la Figura 42, se pueden observar los esfuerzos normales de compresión y tensión que actúan en una viga al ser sometida a flexión.

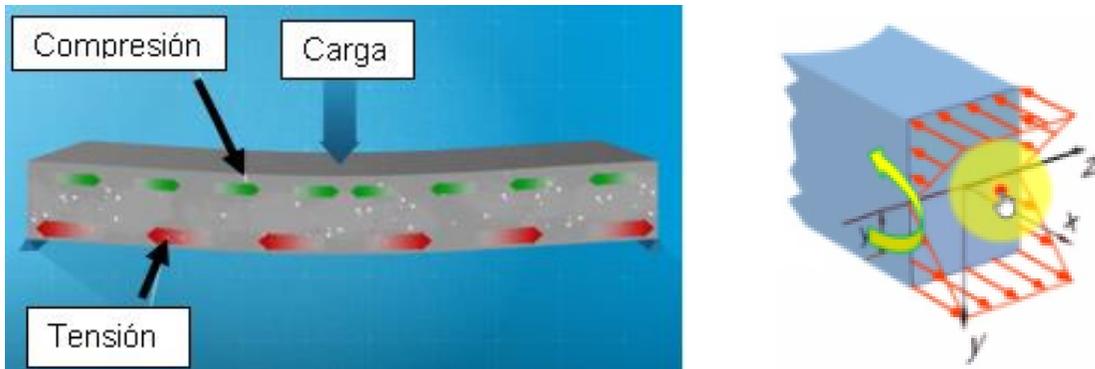


Figura 42. Esfuerzos normales de compresión y tensión que actúan en una viga al ser sometida a flexión (Bekaert 2020).

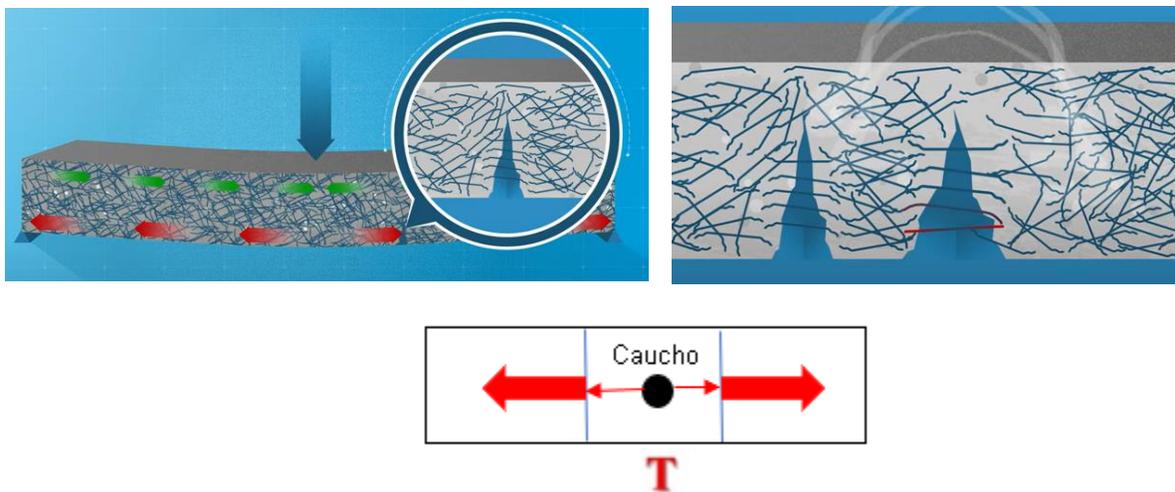


Figura 43. Diagrama de esfuerzo del caucho dentro de la viga (Bekaert 2020).

Analizando el estado de esfuerzo de una viga sujeta a flexión, se interpreta que el caucho se comporta como una fibra que aporta resistencia a tensión una vez que el concreto ha superado su resistencia a la tensión, en ese sentido el caucho no aumenta la capacidad de carga de la viga, pero si aumenta su capacidad de

deformación (Figura 43), provocando que la carga se mantuviera por más tiempo y que la viga no se separe por completo.

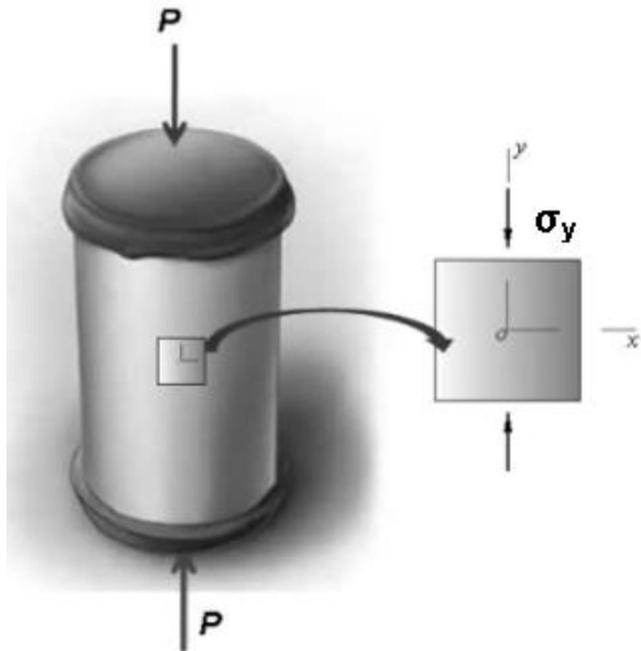


Figura 44. Cilindro de concreto sometido a compresión (Juárez 2020).

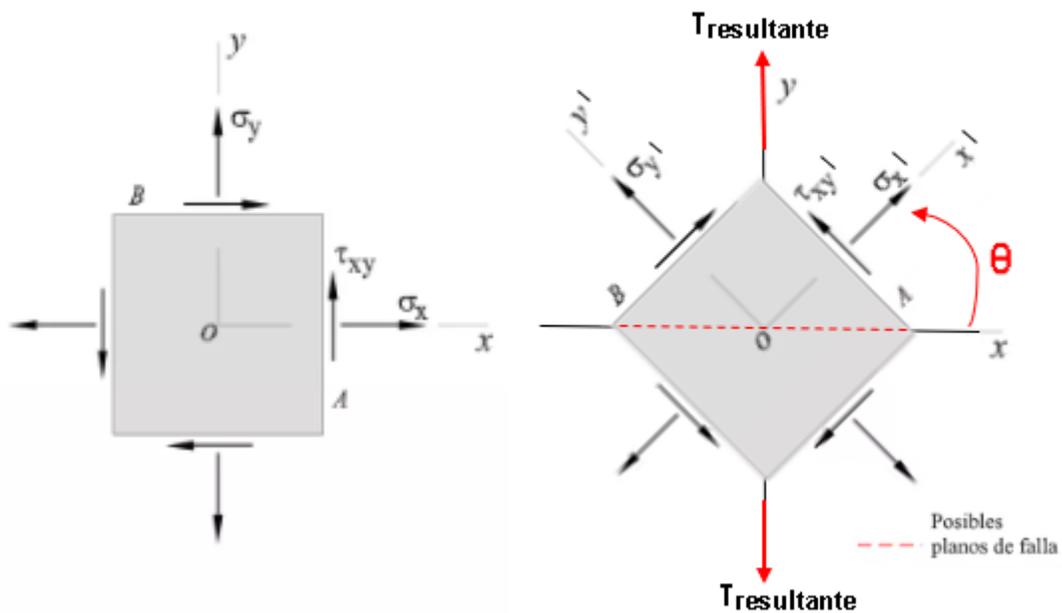


Figura 45. Esfuerzos principales y cortante máximo (Juárez 2020).

En el caso de cilindros de concreto sometidos a fuerzas de compresión, el elemento se somete de manera interna a esfuerzos de compresión que se orientan en el sentido de aplicación de las fuerzas externas (Figura 44), sin embargo, de la construcción del círculo de Mohr, se obtienen que, en un plano diferente orientado a 45 grados de los ejes principales, se presentan en estos esfuerzos cortantes (Figura 45).

Estos esfuerzos cortantes se presentan en las cuatro caras del elemento analizado, para que este esté en equilibrio, es necesario esfuerzos cortantes en las caras verticales del punto analizado, de igual magnitud, pero de sentido contrario, pero el elemento podría girar. Para evitarlo, aparecen otros dos esfuerzos cortantes adicionales en dirección horizontal, Esta configuración de esfuerzos cortantes produce una deformación en el elemento conocida como deformación cortante y definida por el ángulo gamma (γ). En la Figura 45, las flechas rojas representan la resultante del esfuerzo cortante (τ), esa resultante podría ocasionar que el concreto se fisure en una dirección perpendicular a la dirección de la resultante, como se indica con la línea roja punteada. Se si supera la resistencia al cortante del material, la pieza fallará.

Al estar presente una fibra de caucho, esta resultante generaría esfuerzos de tensión en el caucho, igualmente, este no mejora la capacidad de carga, pero si su deformación ya que la carga se mantenía por mayor tiempo (ductilidad), como se muestra en la Figura 46.

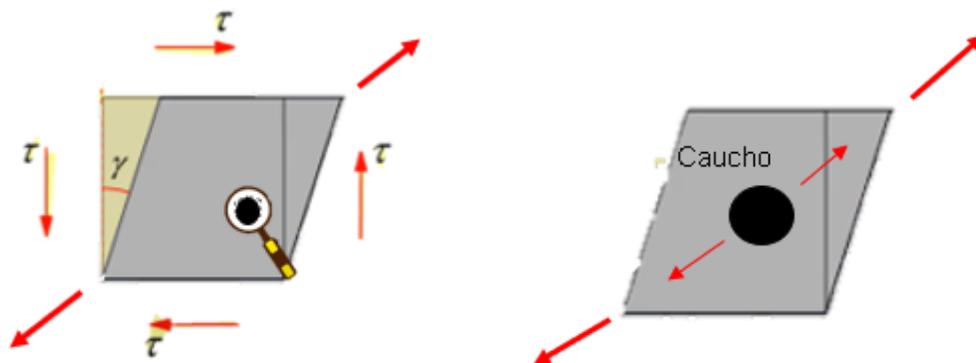


Figura 46. Interpretación esfuerzos del caucho a compresión (Juárez 2020).

4.5. Diseño para pavimento de andadores

Con base a los criterios para el ordenamiento del espacio público, específicamente en andadores, señalado por la secretaría de desarrollo urbano y vivienda de la Ciudad de México (SEDUVI 2019), define que los andadores es el segmento del espacio público reservado para que los peatones transiten o se detengan. El diseño de esta zona peatonal consta de entre 1 y 3 franjas paralelas a la carretera, junto con la guarnición, como se señala en la Figura 47:

1. Franja de desplazamiento peatonal: un espacio donde los peatones pueden moverse sin obstáculos. El ancho mínimo es de 1.20 metros. En aceras de 1.20 metros o menos, el ancho mínimo se reduce a 0.90 metros.
2. Franja de elementos urbanos y equipamiento: un área destinada para instalar elementos urbanos, señales, vegetación y equipamiento.
3. Franja de fachada: un espacio donde los peatones pueden detenerse brevemente.

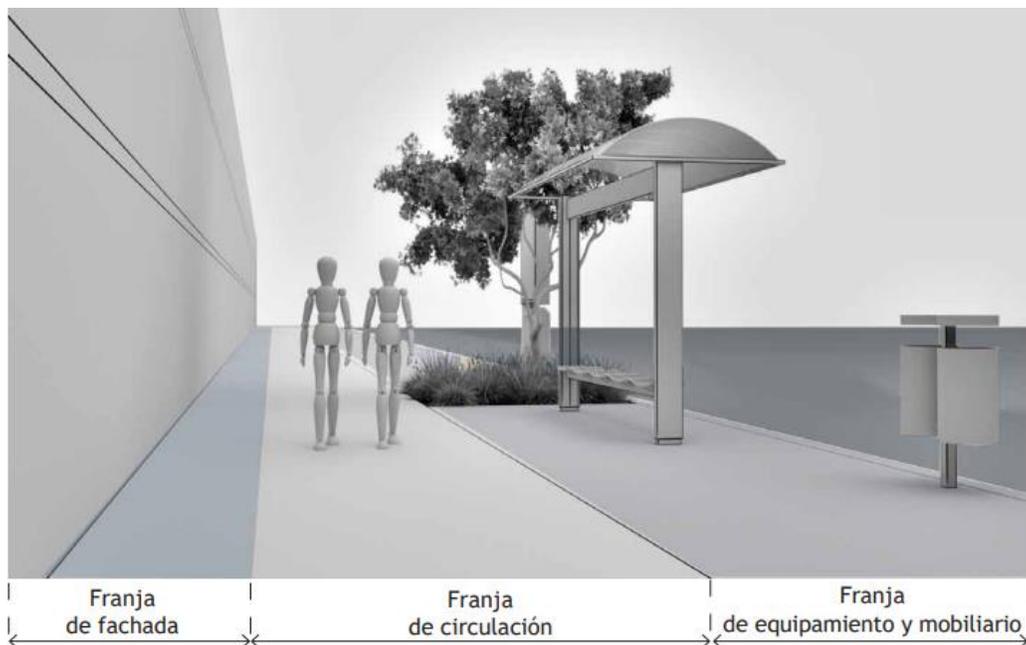


Figura 47. Esquema de franjas en andadores (SEDUVI 2019).

Con respecto al tema del pavimento, el manual (SEDUVI 2019) indica que el espesor mínimo del pavimento será de 5 cm para áreas de tránsito peatonal, además, el andador deberá tener inclinaciones para prevenir la acumulación de agua, siendo el máximo permitido un 2% de pendiente transversal.

Como se señala en la Figura 48, la distancia máxima entre las juntas será de 1.3 cm y las variaciones en altura de hasta 0.6 cm son aceptables sin requerir medidas especiales. En la Figura 49, se señala que las rejillas en el suelo deberán tener separaciones de hasta 1.3 cm como máximo y se colocarán perpendicularmente al camino peatonal.



Figura 48. Detalle de juntas y altura en cambio de nivel vertical (SEDUVI 2019).

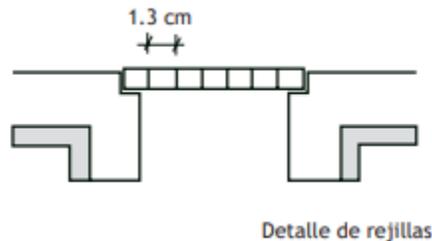


Figura 49. Separación de rejillas (SEDUVI 2019).

En la Figura 50, se muestra un corte de andador donde se señalan los detalles de pavimento de andadores, las guarniciones tienen la opción de ser creados en el lugar mediante vertido de concreto o ser fabricados previamente con las mismas características de acabado que las aceras. Esto incluye la misma mezcla, sellado y textura de superficie, además de estar fortalecidos con varillas de 3/8 pulgadas y tener una resistencia de $f'c$ 150 kg/cm² (SEDUVI 2019). Con base con esta investigación se propone el uso de un concreto adicionado con MK y caucho

implementados en andadores, que alcanzará una resistencia aproximadamente a 250 kg/cm^2 , mayor a la que se recomienda en este manual.

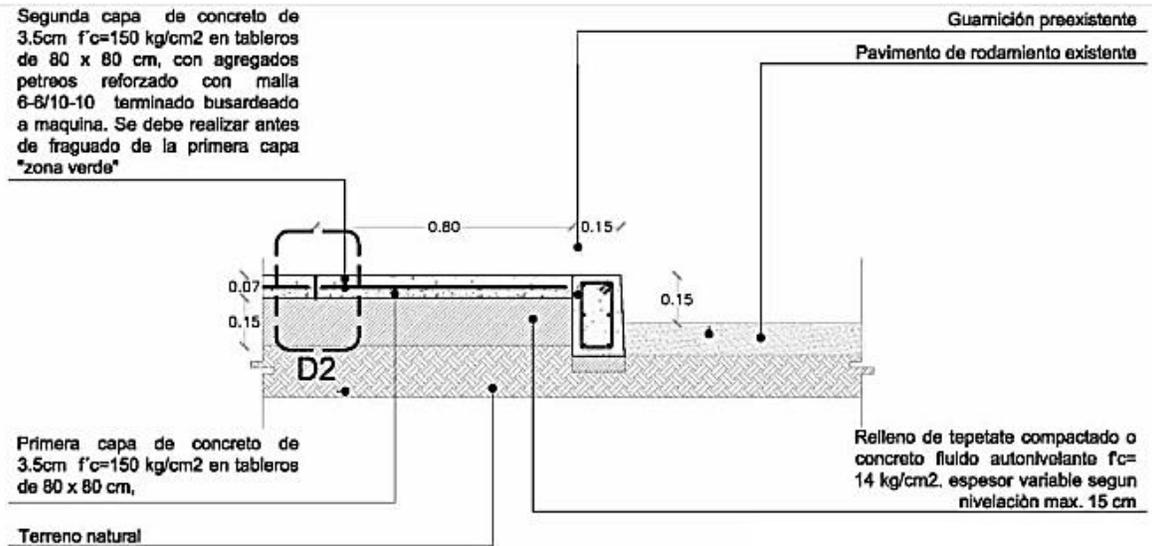


Figura 50. Detalles de pavimento para andador colado en sitio (SEDUVI 2019).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en el desarrollo de esta investigación, se concluye, que la mezcla de concreto adicionado con 17% de MK por sustitución parcial del cemento y 7% de caucho por sustitución parcial de la arena, logra alcanzar la resistencia de 195 kg/cm² a la compresión de diseño a la edad de 28 días, resistencia apta para su posible aplicación en andadores.

Los resultados obtenidos de este concreto están solo por debajo del 2.5% con respecto a la resistencia de 200 kg/cm² de diseño. Se pudo observar que la resistencia a la compresión de las muestras de mortero con distintos porcentajes de adición de caucho disminuyó conforme el contenido de caucho aumentaba, posicionando al 7% como un porcentaje de remplazo óptimo sin pérdidas significativas de resistencia.

Se encontró un valor óptimo entre 15-17% de remplazo de cemento por MK, con un 7% de remplazo de arena por caucho; porcentajes mayores de 20% en MK arrojaron una pérdida considerable de resistencia. De igual modo, se consideró como valor óptimo un 7% de caucho, ya que valores mayores al 8.5% afecta notoriamente la resistencia.

El módulo de elasticidad del concreto adicionado con 17% MK y 7% de caucho, se ve sutilmente reducido por la incorporación de residuo de caucho permitiendo mayores deformaciones en comparación al concreto ordinario, entendiéndose que los agregados provenientes del caucho tienen una rigidez claramente inferior; pero obteniéndose valores muy cercanos o mayores al permisible por la norma.

Las mezclas de mortero y concreto presentaron una buena fluidez y revenimiento, en relación a los diferentes porcentajes de caucho y MK agregado, lo que posibilitó una mezcla adecuada, la realización de especímenes y la extracción de moldes; además brindando una resistencia apta para su uso en trabajos de albañilerías, o pegado de piezas.

Se recomienda realizar estudios en concretos con el mismo porcentaje de sustitución de grano de caucho (7%), pero variando el porcentaje de MK en un rango de 17 a 20%, ya que en 17% se obtuvo un valor favorable, pero en 20% el valor decae significativamente, por lo que se podrá conocer en qué punto la resistencia desciende.

Se observa que el 15% de sustitución de MK por cemento, y el 7% de sustitución de caucho por arena en morteros, presenta una buena resistencia a la compresión de 232 kg/cm², dejando dicha información como un aporte a futuras investigaciones en la creación de un concreto con base a esos porcentajes.

Las muestras de concreto que contenían caucho y MK exhibieron una disminución en su peso a medida que aumentaba la cantidad de caucho. Este fenómeno podría ser atribuido al aumento en la porosidad generada por la estructura, lo que facilita la incorporación de una mayor cantidad de aire durante el proceso de mezclado del concreto en estado fresco. Esta porosidad podría contribuir a una mejora en la capacidad de aislamiento térmico de los morteros de cemento. Además, se deja para futuras investigaciones, investigar morteros que sean adecuados como materiales de revestimiento para su uso en trabajos de albañilería, ayudando a aumentar la eficiencia del aislamiento térmico.

Se recomienda utilizar fibras de caucho con distintas longitudes y superficies para analizar con cual se obtiene una mejor adherencia mecánica en el concreto. Se podrían llevar a cabo pruebas adicionales utilizando aditivos que promuevan una mayor unión entre las partículas de caucho y la pasta de cemento.

Los resultados obtenidos indican que los impactos derivados de la adición de partículas de caucho y de MK en el concreto, son significativos y respaldan la necesidad de seguir avanzando en esta investigación debido a las propiedades notables que han emergido. Además, este enfoque fomenta la reutilización de materiales descartados y contribuye a la conservación de recursos en la construcción.

6. REFERENCIAS

- ACI 116, 2000. *Cement and concrete terminology*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI: ACI Committee 116 Report, ACI 116R-00.
- ALBIDAH, A., ALSAIF, A., ABADEL, A., ABBAS, H. y AL-SALLOUM, Y., 2022. Role of recycled vehicle tires quantity and size on the properties of metakaolin-based geopolymer rubberized concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 18, ISSN 22387854. DOI 10.1016/j.jmrt.2022.03.103.
- ANDRÉS, T., 2014. *Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- BEKAERT, 2020. ¿Cómo trabaja el concreto reforzado con fibra de acero Dramix®? *Bekaert*, ISSN <https://construction.bekaert.com/>.
- BUSTAMANTE, R., RANGEL, C., MAYOR, P. y HERNANDEZ, F., 2008. Propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de placas de mortero caucho-cemento. *UPM*,
- CABANILLAS, E., 2017. *Comportamiento físico mecánico del concreto hidráulico adicionado con caucho reciclado* [en línea]. Perú: Universidad Nacional de Cajamarca Facultad de Ingeniería. [consulta: 11 noviembre 2023]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1029>.
- CALDARONE, M.A., GRUBER, K.A. y BURG, R.G., 1994. *Hight-reactivity metakaolin: a new generation minerals admixture*. S.I.: American Concrete Institute (ACI). vol. 16.
- CARVAJAL, M. y GONZÁLEZ, E., 2014. *Comparación de los módulos de elasticidad de concreto normal, con el ensayo de compresión y el ensayo de flexión* [en línea]. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana Seccional. [consulta: 11 noviembre 2023]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/1744>.
- CSA A3001, 2003. *Cementitious Materials Compondium*. Mississauga, Ontario, Canada: CSA A3001, Canadian Standards Association.

- D'AURELIANO, F.S., COSTA, A.A.F., JÚNIOR, I.F. y D'PEDROSO, R.O., 2019. Manufacture of structural blocks of concrete with waste tire rubbers. *Procedia Manufacturing*. S.l.: Elsevier B.V., pp. 464-470. vol. 38. DOI 10.1016/j.promfg.2020.01.059.
- FARFÁN, M. y LEONARDO, E., 2018. *Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante* [en línea]. Perú: Universidad César Vallejo. Disponible en: www.ricuc.cl.
- FÉLIZ, R., 2018. *Estudio de las propiedades microestructurales y mecánicas de un nuevo cementante sintetizado a base de metacaolín y vidrio reciclado*. Mochis, Sinaloa: Facultad de Ingeniería Mochis.
- FIORITI, C., SEGANTINI, R., PINHEIRO, J., AKASAKI, J. y SPÓSITO, F., 2020. Bloques de mampostería de hormigón liviano fabricados con caucho de neumáticos y metacaolín. *Revista Ingeniería de Construcción* [en línea], Disponible en: www.ricuc.cl.
- GONZALES, D. y SALDAÑA, M., 2020. *Evaluación del impacto ambiental de la empresa Cementos Pacasmayo S.A.A. en su área de influencia, del distrito de Pacasmayo*. Perú: Universidad Cesar Vallejo.
- GONZÁLEZ, J., 2013. *Estudios físicos de los bancos de materiales, cerro blanco de Apaxco y La Lupita y La Magdalena de Ixtapaluca para su uso como agregados en la producción de concreto hidráulico de masa normal*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- GRUBER, K.A., RAMLOCHAN, T., BODDY, A., HOOTON, R.D. y THOMAS, M.D.A., 2001. *Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin*. S.l.: Cement and Concrete Composites.
- GUTIÉRREZ, J., BAENA, O. y TOBÓN, J., 2006. Efectos de la adición de metacaolín en el cemento pórtland. *Año*, vol. 73, ISSN 0012-7353.
- HASANZADEH, M., REZAIFAR, O., GHOLHAKI, M. y KAZEM SHARBATDAR, M., 2021. Performance optimization of ground rubberized green concrete with

metakaolin. *Structures*, vol. 34, ISSN 23520124. DOI 10.1016/j.istruc.2021.08.006.

HERNÁNDEZ, F., 2017. *Métodos empleados en la evaluación de la calidad del concreto lanzado*. CDMX: Universidad Nacional Autónoma de México.

HERNÁNDEZ, J., 2018. *Diseño de un material ecológico para construcción mediante la adición de caucho de llanta al concreto*. Morelos: Universidad Autónoma del estado de Morelos.

ISMAIL, M.K. y HASSAN, A.A.A., 2016. Use of metakaolin on enhancing the mechanical properties of self-consolidating concrete containing high percentages of crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, vol. 125, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.03.044.

JUÁREZ, G., 2020. *Resistencia de materiales UAGRM*. Bolivia: Ciclo de Mohr.

KAJASTE, R. y HURME, M., 2016. Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.07.055.

LÓPEZ, J., 2018. Contaminan el país 32 millones de llantas. *Heraldo de México*,

MA, Q., MAO, Z., LEI, M., ZHANG, J., LUO, Z., LI, S., DU, G. y LI, Y., 2023. Experimental investigation of concrete prepared with waste rubber and waste glass. *Ceramics International*, ISSN 02728842. DOI 10.1016/j.ceramint.2023.02.058.

MARIE, I. y QUIASRAWI, H., 2012. Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, vol. 37, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.07.020.

MEHDIPOUR, S., NIKBIN, I.M., DEZHAMPANAH, S., MOHEBBI, R., MOGHADAM, H.H., CHARKHTAB, S. y MORADI, A., 2020. Mechanical properties, durability and environmental evaluation of rubberized concrete incorporating steel fiber and metakaolin at elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120126.

- MEHTA, K. y MONTEIRO, P., 1998. *Concreto: Estructura, propiedades y materiales*. S.I.: Instituto Mexicano del Cemento y Concreto.
- MEI, J., XU, G., AHMAD, W., KHAN, K., AMIN, M.N., ASLAM, F. y ALASKAR, A., 2022. *Promoting sustainable materials using recycled rubber in concrete: A review*. 1 noviembre 2022. S.I.: Elsevier Ltd.
- MUDULI, R. y MUKHARJEE, B.B., 2020. Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach. *Construction and Building Materials*, vol. 233, ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.117223.
- MUKHARJEE, B.B. y BARAI, S. V., 2014a. Influence of incorporation of nano-silica and recycled aggregates on compressive strength and microstructure of concrete. *Computers and Chemical Engineering*, vol. 71, ISSN 00981354. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.040.
- MUKHARJEE, B.B. y BARAI, S. V., 2014b. Influence of Nano-Silica on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 55, ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.003.
- MUÑOZ PÉREZ, S.P., VIDAURRE VALDERA, J.D., ASENJO BUSTAMANTE, J.S. y GAVIDIA PAREDES, R., 2021. Uso del caucho de neumáticos triturados y aplicados al concreto: una revisión literaria. *Revista de Investigación Talentos* [en línea], vol. 8, no. 1, ISSN 13908197. DOI 10.33789/talentos.8.1.142. Disponible en: <https://talentos.ueb.edu.ec/index.php/talentos/article/view/236>.
- NEJAD, A. yaghoobi y JAHANGIRI, A., 2023. Investigation of the effect of powdered rubber reinforced by different materials on the performance of concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 377, ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.131067.
- NRMCA, 2017. CIP 16-Resistencia a flexión del concreto. [en línea]. S.I.: Disponible en: www.nrmca.org.

- ORBEGOSO, L. y QUEZADA, Y., 2021. *Análisis comparativo del uso de mortero tradicional y mortero predosificado para la reparación de patologías estructurales*. Trujillo, Perú: Universidad Privada del Norte.
- PELISSER, F., BARCELOS, A., SANTOS, D., PETERSON, M. y BERNARDIN, A.M., 2012. Lightweight concrete production with low Portland cement consumption. *Journal of Cleaner Production*, vol. 23, no. 1, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2011.10.010.
- PÉREZ, E., 2014. *Aplicación de métodos lean en el desarrollo de un proyecto eléctrico enfocado a la automatización de un molino de cemento*. México, D.F.: Universidad Iberoamericana.
- QUISPE, B., 2018. *Análisis comparativo de las propiedades mecánicas del mortero tradicional y el mortero con aditivo que incrementa la adherencia*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- RAMDANI, S., GUETTALA, A., BENMALEK, M.L. y AGUIAR, J.B., 2019. Physical and mechanical performance of concrete made with waste rubber aggregate, glass powder and silica sand powder. *Journal of Building Engineering*, vol. 21, ISSN 23527102. DOI 10.1016/j.jobbe.2018.11.003.
- REZAIFAR, O., HASANZADEH, M. y GHOLHAKI, M., 2016. Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method. *Construction and Building Materials*, vol. 123, ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.047.
- RODRIGUEZ, R., 2016. *Comportamiento del hormigón añadido metacaolín como sustituto del cemento, utilizando los agregados existentes en la provincia de Pastaza*. Ecuador: Universidad técnica de Ambato.
- ROMAN, C. y GARZÓN, P., 2015. *Comportamiento mecánico de una mezcla para concreto reciclado usando neumáticos triturados como reemplazo del 10% y 30% del volumen del agregado fino para un concreto con fines de uso estructural*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

- SAAD, M.N.A., ANDRADE, W.P. y PAULON, V.A., 1982. *Properties of mass concrete containing an active pozzolan made from clay*. S.I.: Concrete International.
- SEDUVI, 2019. Criterios para el ordenamiento del espacio público. *Autoridad del espacio público*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Ciudad de México.
- SHA, W. y PEREIRA, G.B., 2001. *Estudio por medio de DSC de la pasta de cemento Portland ordinario que contiene Metacaolín y un acercamiento teórico a la actividad del Metacaolín*. Belfast, U.K: Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Belfast, Belfast, U.K.
- SIDHU, A.S. y SIDDIQUE, R., 2023. Durability assessment of sustainable metakaolin based high strength concrete incorporating crumb tire rubber. *Journal of Building Engineering* [en línea], vol. 72, ISSN 23527102. DOI 10.1016/j.job.2023.106660. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710223008392>.
- SINGH SIDHU, A. y SIDDIQUE, R., 2022. Utilisation of crumb tire rubber in development of sustainable metakaolin based high strength concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 345, ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.128412.
- SIVAKRISHNA, A., ADESINA, A., AWOYERA, P.O. y KUMAR, K.R., 2020. Green concrete: A review of recent developments. *Materials Today: Proceedings*. S.I.: Elsevier Ltd, pp. 54-58. vol. 27. DOI 10.1016/j.matpr.2019.08.202.
- SOUSA, V. y BOGAS, J.A., 2021. Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, vol. 306, ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.127277.
- TAM, V.W.Y., SOOMRO, M. y EVANGELISTA, A.C.J., 2018. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, vol. 172, ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240.

THOMAS, M., 2013. *Supplementary Cementing Materials in Concrete*. CRC Press.
S.l.: s.n.

VILLA, L., 2018. *Procedimientos constructivos de elementos de concreto*. CDMX:
Universidad Nacional Autónoma de México.