ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.984

Mix Design with Synthetic and Steel Fibers in the Mechanical Properties of Concrete

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor[1]; Gustavo Gregorio De La Cruz Dueñas, Magister[2]; Raúl Neil Ramírez Rondan, Doctor[3]; Leydy Nataly Zamora Terrones, Magister[4]; Kelly Raquel Pazos Sedano, Magister[5]; Denise Nicole Diaz Scheering, Bachiller[6]; Renato Alonso Rosas Flores, Bachiller[7]

[1,6,7] Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; denise.diaz@urp.edu.pe; renato.rosas@urp.edu.pe

[2,3,4,5] Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, gdelacruzd@unasam.edu.pe; rramirezo@unasam.edu.pe; Izamorat@unasam.edu.pe; kpazoss@unasam.edu.pe

Abstract. - The research work focuses on the influence of synthetic fibers (FS) and metallic fibers (FM) when added to a concrete mixture with the purpose of improving its mechanical properties. There is a wide variety of fibers used to improve the quality of concrete such as steel fibers, glass, plastic and natural materials, which are available in various shapes, sizes and thicknesses. Each one has technical characteristics that are decisive for the study and will allow analyzing the mechanical properties of concrete without reinforcements compared to concrete reinforced with FS and FM in different dosages to improve the mechanical properties of the concrete. The study used the deductive scientific method, applied orientation, quantitative approach and retrolective data collection instrument. It is descriptive, explanatory, correlational and descriptive level. The design was experimental, longitudinal and prospective and the study was cohort (cause-effect). Three types of laboratory tests were carried out: compressive, flexural and tensile strength for different dosages of FM and/or FS (1%FM, 1%FS, 0.9%F.M + 0.1%FS, 0.825%FM + 0.175%FS , 0.75%FM + 0.25%FS), at the ages of 7, 14 and 28 days with a water-cement ratio (w/c) of 0.64, where cylindrical samples (specimens) and prismatic samples (beams) were made. It was determined that the optimal dosage of FM and F S is the one that has CP + 1% FM as its design, because it presents an improvement in the compression resistance by 1.07%, the flexural resistance increases by 82.61%. , tensile strength increases by 34.08% with respect to pattern concrete. Finally, it is concluded that the mechanical properties improve when a CP + 1%FM design is used because the resistance of the mechanical properties increases with respect to the master concrete (CP).

Keywords: Synthetic fibers, Metallic fibers, Compressive strength, tensile strength and flexural strength

Diseño de mezclas con fibras sintéticas y de acero en las propiedades mecánicas del hormigón

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor[1]; Gustavo Gregorio De La Cruz Dueñas, Magister[2]; Raúl Neil Ramírez Rondan, Doctor[3]; Leydy Nataly Zamora Terrones, Magister[4]; Kelly Raquel Pazos Sedano, Magister[5]; Denise Nicole Diaz Scheering, Bachiller[6]; Renato Alonso Rosas Flores, Bachiller[7]

[1,6,7] Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; denise.diaz@urp.edu.pe; renato.rosas@urp.edu.pe
[2,3,4,5] Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, gdelacruzd@unasam.edu.pe; rramirezo@unasam.edu.pe; Izamorat@unasam.edu.pe; kpazoss@unasam.edu.pe

Resumen. *- El trabajo de investigación se centra en la influencia de las fibras sintéticas (FS) y fibras metálicas (FM) al ser añadidas a una mezcla de hormigón con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas. Existe una gran variedad de fibras utilizadas para mejorar la calidad del hormigón como las fibras de acero, vidrio, plástico y materiales naturales, los cuales están disponibles en diversas formas, tamaños y espesores. Cada una poseen características técnicas que para el estudio son determinantes y permitirán analizar las propiedades mecánicas del hormigón sin refuerzos frente al hormigón reforzado con FS y FM en diferentes dosificaciones para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón. El estudio empleó el método científico deductivo, de orientación aplicada, enfoque cuantitativo e instrumento de recolección de datos retrolectivo. Es de tipo descriptivo, explicativo, correlacional y de nivel descriptivo. El diseño fue experimental, longitudinal y prospectivo y el estudio fue de cohorte (causa-efecto). Se realizó tres tipos de ensayos de laboratorio: resistencia a la compresión, flexión y tracción para distintas dosificaciones de FM y/o FS (1%FM, 1%FS, 0.9%F.M + 0.1%FS, 0.825%FM + 0.175%FS, 0.75%FM + 0.25%FS), a las edades de 7, 14 y 28 días con una relación agua-cemento (a/c) de 0.64, donde se elaboraron muestras cilíndricas (probetas) y muestras prismáticas (vigas). Sé determinó que la dosificación óptima de FM y F S es aquella que tiene como diseño CP + 1%FM, debido a que presenta una mejora en la resistencia a la compresión en 1.07%., la resistencia a la flexión aumenta en un 82.61%., resistencia a la tracción aumenta en un 34.08% con respecto al hormigón patrón. Finalmente se concluye, que las propiedades mecánicas mejoran cuando se emplea un diseño CP + 1%FM porque aumentan las resistencias de las propiedades mecánicas con respecto al hormigón patrón (CP).*

Palabras claves: *Fibras sintéticas, Fibras metálicas, Resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y resistencia a la flexión*

I. INTRODUCCIÓN

Se han realizado en el transcurso del tiempo investigaciones para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón con la adición de distintos elementos. Los aditivos del hormigón han permitido modificar sus características, como su docilidad, su proceso de fraguado, su fluidez, su resistencia, su durabilidad, o su impermeabilidad. Algunos de los componentes que se han agregado al hormigón para mejorar sus propiedades mecánicas son las fibras naturales, como las de banano, bagazo de caña de azúcar, bonote, cascarilla de arroz o cascarilla de café, Álcali, como el NaOH, Policarboxilato, Polietileno condensado. Las propiedades mecánicas del hormigón son importantes para garantizar la seguridad y la durabilidad de las estructuras construidas.

Las FS ayudan al hormigón a desarrollar su integridad óptima a largo plazo mediante la reducción tanto del asentamiento plástico como de la formación de fisuras por contracción, disminuyen la permeabilidad e incrementan la resistencia a la abrasión, la rotura y las fuerzas de impacto. Las FM aumentan la resistencia a la flexión, eso que aparece cuando tenemos una viga y la sometemos a esfuerzos, esta tiende a deformarse. Las FS dan ductilidad, alta resistencia al impacto y control de fisuración en el hormigón. Durante mucho tiempo en los diseños de mezclas de hormigón para incrementar la resistencia se ha aumentado la cantidad de cemento, sus agregados y aditivos ocasionando contaminación ambiental e incrementando el costo de construcción.

El estudio en laboratorio analizó el comportamiento mecánico del hormigón, sin refuerzo frente al hormigón reforzado con las FS y FM en diferentes dosificaciones. Para un hormigón con fibras híbridas (FS + FM) en diferentes proporciones, para un volumen del 1.5% del volumen total. De acuerdo con la Norma Técnica Peruana de edificación E.060 (concreto armado), establece los requisitos mínimos para el análisis, diseño, materiales, construcción y control de calidad del concreto armado en el Perú, se estimaron 54 briquetas para ser ensayadas a las edades de 7, 14 y 28 días. Se prepararon 3 series, cada serie de 6 mezclas y cada mezcla con 3 proporciones distintas de fibras haciendo un total de 1.5% del volumen total. Los especímenes fueron curados por 24 horas y testeados a los 28 días. Se obtuvo como resultado que el uso de las FS mejora la trabajabilidad del hormigón [1].

El diseño de 16 mezclas con diferentes volúmenes de FS y FM, con la finalidad de estudiar el comportamiento de la resistencia a la compresión, tracción, flexión y tenacidad. Los ensayos mostraron que al incorporar las fibras de polipropileno resultaron en un cambio menor respecto a la compresión. Mientras que las FM incrementaron significativamente su ductibilidad a la compresión y flexión, especialmente en los diseños hechos por ambas fibras, la resistencia al impacto mejoró. Por consiguiente, el uso de ambas fibras mostró un excelente efecto en las propiedades mecánicas, resultando mejor cuando están separadas. Una excepción que la adición de las FM individuales aumentó significativamente durante el ensayo a compresión [2].

Las fibras de polipropileno son un aditivo que se agrega al hormigón para reducir las fisuras por contracción, aumentar la resistencia a la tracción, la resistencia al impacto, la resistencia a la corrosión, la tenacidad, la vida útil del pavimento. Las fibras de polipropileno son un refuerzo alternativo a las mallas, más barato y fácil de usar. La utilizaron FM en 0%, 0.1%, 0.175%, 0.25% y 1%; así como fibras de polipropileno 0%, 0.1%, 0.175%, 0.25% y 1% con y sin polvo de caucho. Las respuestas mostraron que el hormigón con fibras híbridas al 0.1% FS y 0.9% de FM tienen mayor resistencia en el ensayo a compresión y a la tensión de ruptura, que las demás mezclas. Las FM mejoraron significativamente la respuesta a la flexión. Las mezclas con 1% de FS influyeron de manera negativa las propiedades mecánicas del hormigón [3]. La adición FM la cual mejoró ligeramente la repuesta del hormigón a la compresión, mientras que el uso de FS tuvo efectos adversos en la respuesta del hormigón frente al esfuerzo a la resistencia a la compresión. El comportamiento de impacto y la resistencia a la flexión mejoraron acorde con el contenido de FM que aumentaba también. Además, el uso de FM fue beneficioso ya que aumenta la resistencia a la tracción y a la resistencia a la compresión del hormigón reforzado con fibras, luego de estar expuesto a altas temperaturas [4].

El uso de FM y FS aumenta la resistencia de las propiedades mecánicas y dúctiles del hormigón. Las fibras híbridas en el hormigón (FS + FM) mejoran la resistencia a la flexión y la tenacidad, y reducen la fisuración. En los ensayos de laboratorio para determinar la resistencia a la compresión mostró un modo de falla dúctil, sin desprendimiento de hormigón. Las fibras híbridas es un material compuesto de cemento, agregados, agua y fibras de dos o más tipos, estas fibras refuerzan la masa del cemento, lo que mejora sus propiedades mecánicas.

Se estudió el impacto de las fibras en la densidad, absorción de agua y vacíos en el hormigón. Se usaron ratios para las fibras de polipropileno de 0%, 0.1%, 0.175%, 0.25% y 1% mientras que para las macro FM utilizaron 0%, 0.75%, 0.825%, 0.9% y 1% de volumen. Los hormigones con refuerzo híbrido muestran mejoras significativas en la resistencia a la compresión con los hormigones que solo usan un refuerzo. Las muestras con proporciones de 0.1% PF y 0.9% FS tuvieron una mayor resistencia a la compresión de aproximadamente de 106% por encima del hormigón patrón. Así también, con esta misma proporción se obtuvo una mejora en disminuir la densidad, la absorción de agua y vacíos en el diseño de mezcla [5]. Para hormigones armado con FS y FM con reducción en el refuerzo cumple con los requisitos para su refuerzo ordinario. También mejora la rigidez, posterior a la fisuración. Para la misma dosificación volumétrica los segmentos tienen un momento de agrietamiento similar y un ancho grieta de 0.20 mm, sin embargo, el momento último y la rigidez post-fisuración del hormigón armado con FS son ligeramente inferiores que las de hormigón armado con FM [6].

La influencia de las FS y FM en pavimentos rígidos, hicieron la comparación de dos diseños de hormigones, uno de baja dosificación y un hormigón convencional para una resistencia de 320 kg/cm^2 y el otro con las mismas características del anterior, solo que se adicionaron FM y FS. En los ensayos a compresión de los hormigones con refuerzo de fibras tienen un incremento del 25% con respecto al hormigón patrón, mientras que a diferencia en la resistencia a la flexión entre ambos diseños fue de 25.5% a los 28 días [7]. La resistencia a la compresión del hormigón reforzado con fibra, como las fibras monoacero, monopolipropileno y fibras híbridas de acero durante el proceso de falla dinámica y el daño, revelaron que la fibra monoacero es la más eficaz para mejorar las resistencias que aumentan en un 21,92% y un 21.05% respectivamente, en comparación con el hormigón simple [8].

La contribución de fibras híbridas (FS + FM) mejoran la capacidad de punzonamiento con respecto a la conexión de columnas de losas de hormigón. Los diseños incluyeron una mezcla de hormigón monofibra con volumen de FM del 0.5%; una mezcla de hormigón hibrido reforzado con fibras con un volumen de FM del 0.5%, un volumen de fibras de polipropileno del 0.2%, una mezcla híbrida de hormigón reforzado con fibras con un volumen de FM del 1.5% y un volumen de fibra de polipropileno del 0.2%. Una vez concluidos los ensayos, se evidenció una mejora notable en la capacidad de corte por punzonamiento en mezclas de hormigón con fibras, así como en la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la ductibilidad y la tenacidad. Los resultados indicaron que las fibras no ejercen un impacto considerable en la resistencia al esfuerzo a la resistencia a la compresión, pero tienen la capacidad de incrementar la resistencia en los ensayos de resistencia a la flexión hasta en un 28% [9].

Las fibras de poliolefina mejoran la durabilidad y las propiedades mecánicas del hormigón, aumentan la resistencia a la penetración de iones de cloruro, la resistencia a la compresión en entornos de sulfato, la resistencia al impacto y al desgaste, mejoran la tenacidad, reducen la retracción plástica y la migración de agua, reducen el rebote en hormigón proyectado y mejoran la resistencia a la propagación de grietas. Las fibras de poliolefina se pueden utilizar en la construcción de pavimentos, túneles, carreteras, entre otros. Las fibras de poliolefina se pueden mezclar con el hormigón mientras este aún es plástico, lo que les permite proporcionar beneficios antes de que se endurezca. El uso de fibras de poliolefina y FM para tres proporciones de volumen se utilizaron para medir la resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, los resultados indicaron que las fibras no ejercen un impacto significativo en la resistencia en las pruebas de compresión, mientras que incrementan la resistencia en las pruebas de flexión hasta en un 28%. Las evaluaciones de resistividad indicaron que las fibras de poliolefina optimizan el rendimiento del hormigón en contra de la corrosión, mientras que las FM disminuyen la resistencia a la corrosión [10].

El comportamiento torsional de vigas huecas de hormigón armado con varios tipos de fibras. Se utilizó el contenido de fibra del 1% con tres longitudes diferentes de FS, 19.38 mm y 57 mm, junto con 13 mm de FM. Las FS y FM mejoraron el rendimiento general bajo la carga de torsión en comparación con el comportamiento de las vigas patrón. La mejora en el rendimiento fue relativa al tipo y longitud de la fibra. Para la primera carga de fisuración, las muestras ensayadas reforzadas con fibras de 19 mm y 37 mm de longitud mostraron el mismo valor [11]. La resistencia y ductibilidad de las columnas cortas de hormigón ordinario limitadas por tirantes con y sin FM y fibras de polipropileno. Se construyeron cinco columnas cuadradas de hormigón, donde se ensayaron bajo carga axial. Los resultados indicaron que la adición de FM al 0.75% en el hormigón incrementó la resistencia en las pruebas de tracción, flexión, compresión y módulo de elasticidad [12]. Se utilizaron tres tipos de fibras, fibra de polipropileno, acero y vidrio, para reemplazar el volumen de hormigón en un 0.3%. Los resultados experimentales en donde compararon el hormigón de referencia, con el hormigón reforzado, tuvieron cambios comparables en las propiedades frescas. Sin embargo, hubo una disminución del flujo de asentamiento y aumento significativo del volumen de aire incorporado debido a la fibra de polipropileno. Pero el uso de varias fibras significativas tuvo un efecto no beneficioso sobre la compresión, mientras que para la flexión hubo un ligero aumento [13].

Las fibras de macro polipropileno tienen un efecto positivo en el hormigón, ya que reducen la fisuración y mejoran su resistencia, reducen la contracción hidráulica lo que minimiza el riesgo de fisuración, mejoran la resistencia al impacto y evitan la erosión. Son una alternativa a las mallas de refuerzo, más baratas y fáciles de usar, además; son resistentes a la corrosión, no son corrosivas ni magnéticas, se mezclan fácilmente en el hormigón, aportan tenacidad a la estructura, controlan la fisuración en elementos expuestos a condiciones de alta evaporación, mitiga el efecto de desprendimiento explosivo que se produce cuando el hormigón es expuesto a altas temperaturas, mejora la resistencia a la flexión, al impacto y al desgaste del hormigón, aumenta la impermeabilidad del hormigón. Las propiedades de un hormigón normal, reforzado con fibras de polipropileno, otro con fibras de macropolipropileno sintético de alto rendimiento y FM en condiciones de curado, tuvieron como resultado el aumento de fibras reduce la trabajabilidad de estas mezclas que contienen material cementoso.

La mezcla que comprende un 1% de FM y un 0.2% de fibras de polipropileno registró el valor más alto de resistencia en los ensayos de la resistencia a la compresión. La resistencia elevada a la tracción se atribuye a la combinación de 0.5% de fibras de macropolipropileno, 1% de FM y 0.2% de fibras de polipropileno. Se observó que la mezcla que contiene 0.5% de fibras de macropolipropileno y 1% de F.M. disminuye la trabajabilidad del hormigón [14]. La durabilidad para hormigones con resistencia en los ensayos a la compresión a 28 días con un valor de 21 Mpa reforzados con FM y FS, obtuvieron los siguientes resultados: las resistencias con FS fueron 1.5 kg/m^3, 3 kg/m^3 y 5 kg/m^3 y para FM 5 kg/m^3, 9 kg/m^3 y 18 kg/m^3 [15].

El presente estudio tuvo como objetivo determinar los porcentajes de FS y FM que mejoren la resistencia a compresión, flexión y tracción del hormigón. Estas fibras pueden ser utilizadas de

manera híbrida e independiente, y en diferentes dosificaciones. La dosificación óptima obtenida a partir del estudio es de 0.9% FM y 0.1% FS obteniendo mejoras en la resistencia a la compresión, tracción y flexión, disminuyendo el porcentaje de cemento al usar las fibras, contribuyendo a la protección del medio ambiente al no utilizar mayor cantidad de materia prima y reducir los costos en el sector construcción.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se abordó desde una perspectiva metódica y estructurada, adoptando el método científico deductivo con una clara orientación hacia la aplicación práctica del conocimiento generado. En este sentido, se partió de principios generales para explorar su manifestación en el contexto específico del estudio. La naturaleza de los datos analizados, fundamentalmente porcentajes de finos y filler mineral, así como los valores de resistencia a la compresión obtenidos en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), determinaron la elección de un enfoque cuantitativo. La información para el análisis provino directamente de los ensayos realizados en el laboratorio, cuyos resultados fueron cuidadosamente organizados y presentados a través de tablas y representaciones gráficas, facilitando así la identificación de tendencias y patrones significativos. El instrumento de recolección de datos se caracterizó por su naturaleza retrolectiva, aprovechando de manera eficiente los registros y formatos ya existentes en el entorno del laboratorio. Esta estrategia permitió optimizar el proceso de obtención de la información necesaria para el desarrollo de la investigación.

En cuanto a la tipología de la investigación, se integraron elementos descriptivos, explicativos y correlacionales. Inicialmente, se llevó a cabo una revisión de la literatura académica pertinente, con el objetivo de construir una base teórica sólida y comprender en profundidad la problemática objeto de estudio. Posteriormente, se profundizó en la búsqueda de las razones y los factores que dieron origen a dicha problemática. Finalmente, se exploró la relación existente entre las variables clave, como los porcentajes de finos y *filler* mineral, por un lado, y las propiedades mecánicas del hormigón, por el otro, con el fin de determinar si existía una correlación estadísticamente significativa entre ellas y, de ser así, cuantificar su magnitud.

El nivel de estudio abarcó tanto la descripción detallada de los fenómenos observados como la manipulación controlada de variables en un entorno experimental. En este sentido, se describieron las características distintivas de los diferentes diseños de hormigón y las propiedades resultantes de cada uno. Adicionalmente, se implementó un diseño experimental de carácter longitudinal y prospectivo. La variable independiente, definida por las proporciones de finos y *filler* mineral, fue modificada de manera sistemática en la formulación de diversas mezclas de hormigón. La dimensión longitudinal del estudio se evidenció en la realización de ensayos a diferentes edades de curado para cada diseño, lo que permitió observar la evolución de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo.

Finalmente, la investigación adoptó un diseño de cohorte, centrándose en la relación causa-efecto. Se analizaron distintos grupos de hormigón, cada uno caracterizado por diferentes porcentajes de finos y filler mineral (la causa), para investigar y cuantificar su influencia directa (el efecto) sobre las propiedades mecánicas del material. Este enfoque permitió establecer vínculos causales entre la composición de la mezcla y el comportamiento del hormigón.

La población de estudio (tabla 1) fue de 162 probetas cilíndricas de hormigón para medir la resistencia a la compresión, flexión y tracción según la Norma E.060. El diseño muestral del estudio fueron las probetas que se prepararon, las cuales cumplieron con la normativa actual. En el estudio se usaron como muestra las probetas con diferentes dosificaciones de FS y FM. Las probetas usadas fueron de 4”x8” de dimensión. Para el cálculo de las probetas se utilizaron para las diferentes edades (7, 14, 28 días) 3 probetas para cada tipo de diseño:

- Concreto patrón (CP)
- CP + 1%FM
- CP + 1%FS
- CP + 0.9%FM+0.1%FS
- CP + 0.825%FM+0.175%FS
- CP+0.75%FM + 0.25%FS

Por lo tanto, se necesitan por muestra:

Probetas de 4”x8”	=	3
Edades de rotura: 7, 14 y 28	=	3
Tipos de diseño	=	6

En la tabla 1, se presenta el número total por especímenes por muestras cilíndricas de hormigón para diferentes edades 7, 14 y 28 días.

TABLA 1
MUESTRAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN PARA LOS ENSAYOS – PROPIEDADES MECÁNICAS A LOS 7, 14 y 28 DÍAS

Tipo de diseño	Propiedades mecánicas (kg/cm^2)			
	Compresión	Flexión	Tracción	Total
Concreto patrón CP	9	9	9	27
CP+ 1%FM	9	9	9	27

CP+ 1%FS	9	9	9	27
CP+ 0.9%FM+0.1%FS	9	9	9	27
CP + 0.825%FM+0.175%FS	9	9	9	27
CP+0.75%FM + 0.25%FS	9	9	9	27
Total	54	54	54	162

Nota. En total se requiere 162 probetas para hallar la resistencia del hormigón.

III. RESULTADOS

Porcentajes de fibras sintéticas (FS) y fibras metálicas (FM) y su influencia en la resistencia a la compresión del hormigón.

Los resultados presentados en la tabla 2 y fig. 1 sobre la resistencia a la compresión al incorporar porcentajes de FS y FM y mezcla en forma hibrida (FS + FM), muestran los distintos valores obtenidos para los diseños trabajados. Según se observa en la fig. 1, a medida que se va incrementando el porcentaje de FS en las mezclas, la resistencia a la compresión va disminuyendo, siendo la dosificación de 0.9% FM y 0.1% FS la mejor dosificación de fibras híbridas debido a que presenta un valor cercano al hormigón patrón y al mejor resultado que es aquella mezcla con 1% de FM.

TABLA 2
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN a los 28 DÍAS

Diseño	Resistencia a la compresión a los 28 días (Kg/cm^2)
Hormigón patrón (CP)	375.60
CP + 1% FM	379.62
CP + 1% FS	247.52
CP + 0.9%FM + 0.1%FS	356.52
CP + 0.825%FM + 0.175%FS	339.57
CP + 0.75%FM + 0.25%FS	331.81

Basado en los resultados observados en la fig. 1, se concluye que la dosificación óptima de FS y FM mejora la resistencia a la compresión del hormigón en un 1.07% con un diseño CP + 1%FM%. con respecto a la muestra patrón (CP).

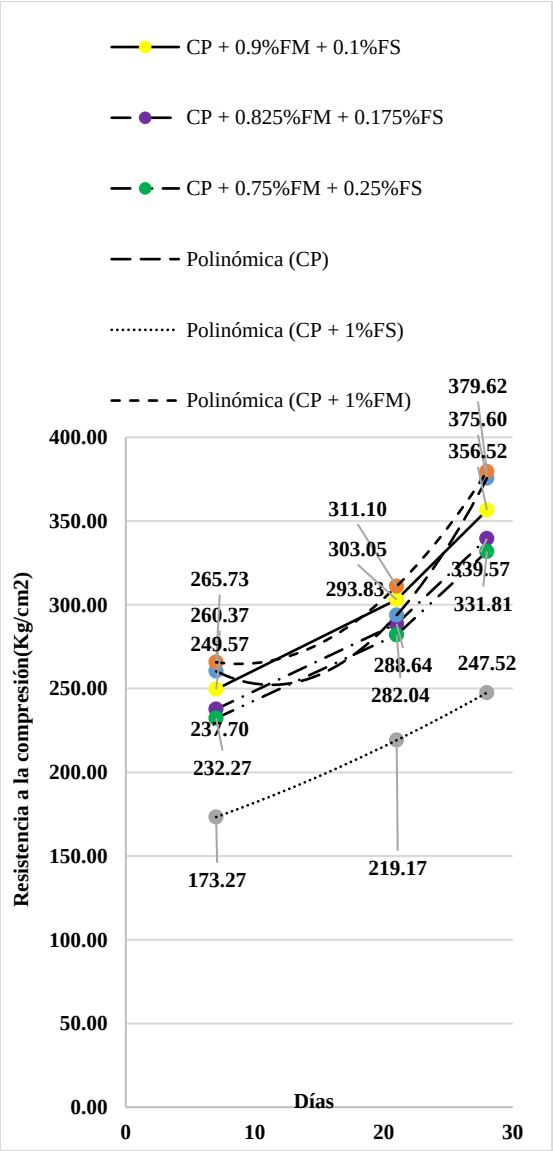


Fig. 1 Resistencia a la compresión del hormigón por tipo de diseños con fibras sintéticas (FS) y fibras metálicas (FM).

Porcentajes de fibras sintéticas (FS) y fibras metálicas (FM) y su influencia en la resistencia a la flexión del hormigón

Los resultados del estudio se presentan en la tabla 3 y fig. 2, donde se resume los distintos valores de resistencia a la flexión obtenidos para los diseños de mezcla trabajados. Según se observa en la fig. 2, a medida que se va incrementando el porcentaje de FS en las mezclas, la resistencia a la flexión va aumentando, siendo la dosificación de 0.9%FM y 0.1% FS la mejor dosificación de fibras híbridas debido a que incrementa un 82% la resistencia a la flexión respecto al hormigón patrón. Además, la resistencia a la flexión aumenta también en las otras mezclas a excepción de aquella que solo contiene FS, cuyo valor es ligeramente menor al hormigón patrón.

TABLA 3
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN A LOS 28 DÍAS

Diseño	Resistencia a la flexión a los 28 días (Kg/cm^2)
Hormigón patrón (CP)	66.30
CP + 1% FM	71.54
CP + 1% FS	61.05
CP + 0.9%FM + 0.1%FS	121.07
CP + 0.825%FM + 0.175%FS	114.67
CP + 0.75%FM + 0.25%FS	114.35

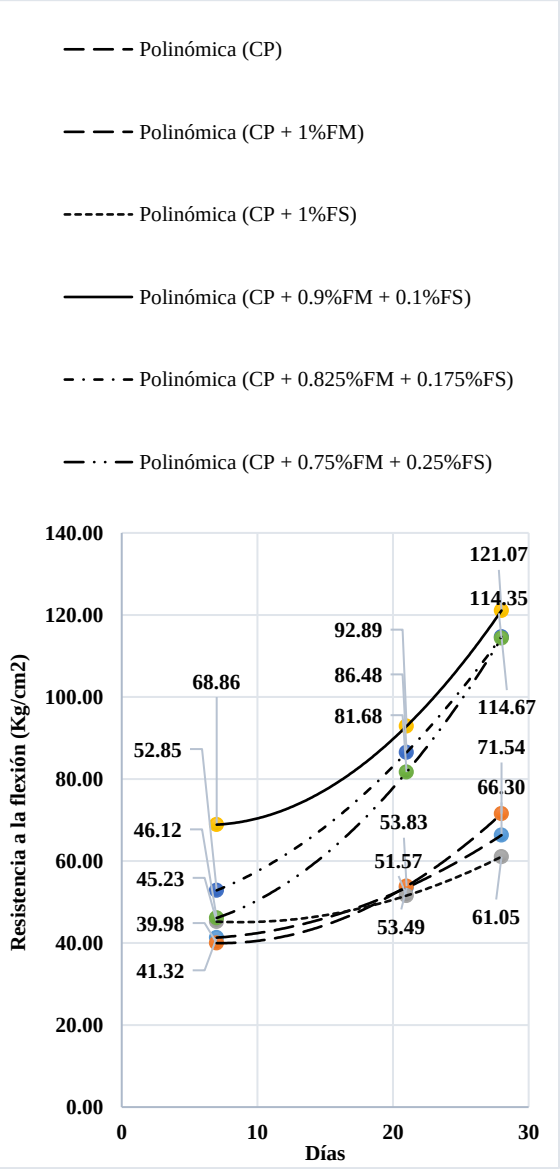


Fig. 2 Resistencia a la flexión del hormigón por tipo de diseños con fibras sintéticas (FS) y fibras metálicas (FM).

Según los resultados observados en la fig. 2, se concluye que la dosificación óptima de FS y FM mejora la resistencia a la flexión del hormigón en un 82.61% con un diseño CP + 1%FM%. con respecto al hormigón patrón (CP).

Porcentajes de fibras sintéticas (FS) y fibras metálicas (FM) y su influencia en la resistencia a la tracción del hormigón

Los resultados obtenidos en esta investigación se encuentran en la tabla 4 y fig. 3, que resume los distintos valores de resistencia a la tracción correspondientes a los diseños de mezcla analizados. Las mezclas que incorporaron FM y/o FS presentaron una resistencia a la tracción superior en comparación con el hormigón patrón. La dosificación más efectiva fue la que tuvo 1% de FM.

TABLA 4
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DEL HORMIGÓN A LOS 28 DÍAS

Diseño	Resistencia a la tracción a los 28 días (Kg/cm^2)
Hormigón patrón (CP)	48.97
CP + 1% FM	66.73
CP + 1% FS	49.77
CP + 0.9%FM + 0.1%FS	60.20
CP + 0.825%FM + 0.175%FS	58.30
CP + 0.75%FM + 0.25%FS	54.97

Según los resultados observados en la fig. 3, se concluye que la dosificación óptima de FS y FM mejora la resistencia a la tracción del hormigón en un 34.08% con un diseño CP + 1%FM%. con respecto al hormigón patrón (CP). Según los resultados observados en la fig. 3, se concluye que la dosificación óptima de FS y FM mejora la resistencia a la tracción del hormigón en un 34.08% con un diseño CP + 1%FM%. con respecto al hormigón patrón (CP).

En resumen, la incorporación de FS y FM en el hormigón contribuye a mejorar de manera significativa sus propiedades mecánicas. Las FM, en particular, aumentan la resistencia a la tracción, flexión y corte, mejorando la tenacidad y ductilidad del hormigón. Este refuerzo evita la propagación de grietas, aumentando una mayor resistencia a cargas dinámicas, impactos y solicitaciones cíclicas. La combinación de las FS y FM optimizan la capacidad de carga, la durabilidad y el comportamiento estructural frente a condiciones extremas. Además, esta solución reduce los refuerzos de armaduras tradicionales, lo que contribuye a la sostenibilidad y eficiencia en los proyectos de construcción. La mayor durabilidad del hormigón reduce el costo de mantenimiento y reparación, estas ventajas hacen que los proyectos sean más sostenibles, sino también más

rentables, favoreciendo la eficiencia en el uso de materiales y recursos.

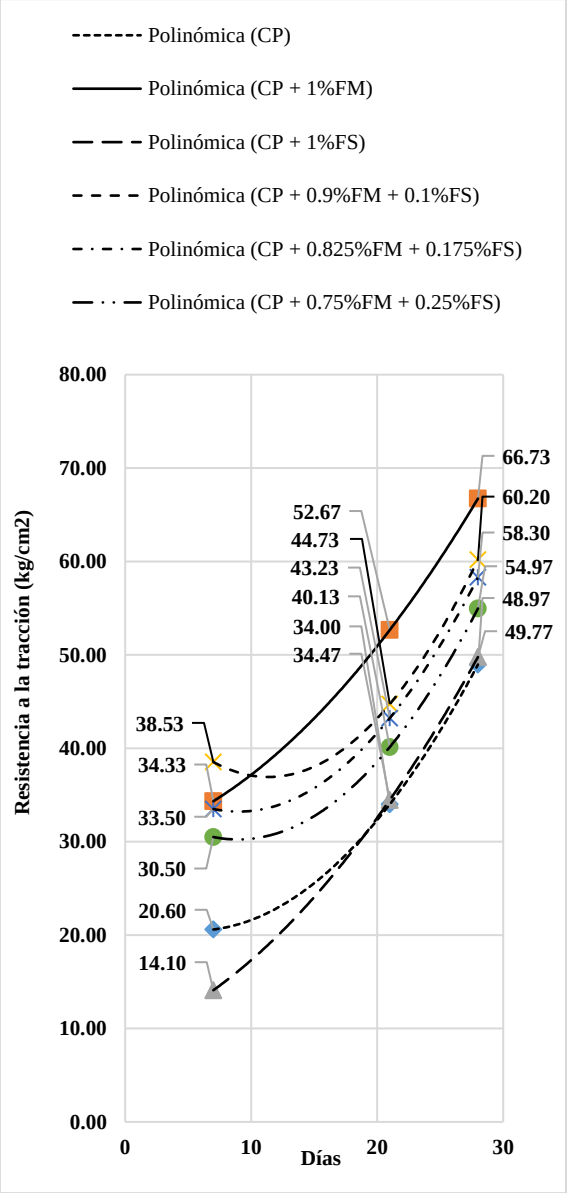


Fig. 3 Resistencia a la tracción del hormigón por tipo de diseños con fibras sintéticas (FS) y fibras metálicas (FM).

Discusión. - Los resultados de la resistencia a la compresión obtenidos para las diversas mezclas con FS y FM presentan valores similares al hormigón patrón. Estos valores tienen congruencia con lo planteado por [16], quienes realizaron un comparativo entre un hormigón patrón y otras cinco mezclas con dosificaciones de 1%FM, 1%FS, 0.9%FM + 0.1%FS, 0.825%FM + 0.175%FS, 0.75%FM + 0.25%FS. Sus resultados evidenciaron valores muy cercanos al hormigón patrón en casi todas las muestras, incluso obteniendo valores superiores al hormigón patrón para las dosificaciones de 0.9%FM + 0.1%FS y 0.825%FM + 0.175%FS. Por otro lado [17], utilizaron las mismas dosificaciones anteriormente mencionadas, en donde obtuvieron similares resultados ya que el mayor aumento en la resistencia a la compresión también se obtuvo para las graduaciones de 0.9%FM + 0.1%FS y 0.825%FM + 0.175%FS.

Los resultados de la resistencia a la flexión obtenidos para las distintas mezclas con FS y FM tienen valores superiores respecto al hormigón patrón a excepción de aquella mezcla que solo contenía FS. Estos valores tienen congruencia con lo planteado por [16], quienes realizaron un comparativo entre un hormigón patrón y otras cinco mezclas con dosificaciones de 1%FM, 1%FS, 0.9%FM + 0.1%FS, 0.825%FM + 0.175%FS, 0.75%FM + 0.25%FS. Los resultados muestran valores de mejora respecto al hormigón patrón en todas las mezclas a excepción de aquella que solo contiene FS.

Los valores de resistencia a la tracción obtenidos para las distintas mezclas con FS y FM tienen valores superiores respecto al hormigón patrón. Estos valores son similares con lo planteado por [16], quienes realizaron un comparativo entre un hormigón patrón y otras cinco mezclas con dosificaciones de 1%FM, 1%FS, 0.9%FM + 0.1%FS, 0.825%FM + 0.175%FS, 0.75%FM + 0.25%FS. Sus resultados muestran valores de mejora respecto al hormigón patrón en todas las mezclas a excepción de aquella que solo contiene FS. Los investigadores [18], indicaron que el módulo de rotura del hormigón, se estableció los parámetros a tener presenta para el diseño de mezclas de hormigón con adición de FS y FM. Concluyeron que, a mayor cantidad de fibra, se obtuvo mayor esfuerzo residual.

El comportamiento del hormigón reforzado con diversos tipos de materiales fibrosos y someterlos a pruebas de resistencia a la compresión y flexión, se descubrió que una de las fibras ofrecía un mejor desempeño. Se utilizaron las mismas proporciones en las mezclas, pero las longitudes de las fibras variaron en cada caso. Se emplearon diferentes tipos de fibras, como fibras de acero, tereftalato de polietileno (PET), fibras de vidrio y cáñamo. Las muestras de hormigón reforzado con macrofibras exhibieron propiedades mecánicas ventajosas, particularmente en relación con su resistencia a la compresión y flexión. Se llegó a la conclusión de que, en la mayoría de los casos, se observó un incremento en la resistencia y una reducción en el agrietamiento, siendo la fibra de acero la única que evidenció una mejora tanto en la mejora a la compresión y flexión [19].

La mezcla del hormigón reforzado con FS indicó que los ensayos de resistencia a flexión al 0.5%, 1%,1 .5%, 2.0% y 3.0% con respecto al peso del agregado grueso, dichos resultados se compararon con 5 muestras cilíndricas de hormigón con FS y 5 muestras prismáticas de hormigón normal, concluyendo que la unión entre los demás materiales y las fibras evitan la falla repentina del espécimen de

hormigón [20]. El hormigón con el mejor desempeño, utilizando cantidades similares de cada tipo de fibra obtuvieron como resultado después de 28 días una mejora del 8% en los ensayos de la resistencia a la compresión con FS, en comparación con un 5% con FM. En los ensayos a la resistencia a la tracción, las FS lograron un incremento del 33%, mientras que las FM mejoraron un 24% [21].

La incorporación de FM mejora las propiedades del hormigón. Para llevar a cabo la investigación, utilizaron 90 probetas cilíndricas y 30 prismáticas, en las cuales realizaron ensayos de compresión, tracción y flexión. Las FS D2, dosificadas a 985 gr. por metro cúbico, resultaron valores de 328 kg. por centímetro, 35.4 kilogramos por centímetro y 46.6 kg. por centímetro, tras un periodo de 28 días de experimentación. En contraposición, el hormigón que incorporaba fibra sintética D2 en la misma concentración de 985 gr. por metro cuadrado demostró un incremento mínimo en la resistencia a la compresión, tracción y flexión tras 28 días de experimentación, registrando resultados de 311 kg/cm^2, 33.8 kg/cm^2 y 41.5 kg/cm^2, respectivamente, en comparación con el hormigón patrón [22]

La proporción de FM empleadas fue de 60 kg/m^3, 75 kg/m^3, 90 kg/m^3 y 105 kg/m^3. Con este propósito, se diseñó un hormigón con una resistencia a la compresión de 210 kg/cm^2, conforme a las especificaciones de la Norma Técnica Peruana de edificaciones y su correspondiente en la Norma ASTM, así como en el ACI 211. El diseño del hormigón también contempló la incorporación de un aditivo plastificante, identificado como HE-98, con el objetivo de optimizar la trabajabilidad del material. Según los hallazgos de los ensayos de compresión y flexión, la aplicación del aditivo plastificante contribuye a la mejora de la trabajabilidad para volúmenes elevados de FM. En suma, estos ensayos han resultado en estructuras más dúctiles, con una mayor capacidad para resistir esfuerzos de compresión y flexión [23].

CONCLUSIONES

La incorporación de fibras sintéticas (FS) y de acero (FM) en el diseño de mezclas de hormigón optimiza sus propiedades mecánicas, lo que se traduce en construcciones más seguras y duraderas, con una menor necesidad de mantenimiento. Esto conlleva un ahorro económico significativo y una mayor resiliencia social. Desde una perspectiva ambiental, esta tecnología reduce la generación de residuos, facilita el uso de materiales reciclados y disminuye el consumo de cemento, contribuyendo así a la reducción de la huella de carbono. En consecuencia, se promueve una construcción más eficiente, sostenible y en concordancia con los desafíos actuales del desarrollo urbano y el cambio climático. El empleo de hormigón con fibras híbridas (FM y FS) potencia las propiedades mecánicas gracias a una mejor adherencia y a la prevención de la propagación de fisuras o grietas. En muestras con un solo tipo de fibra, el uso de superplastificante permite un control más preciso de la dosificación al incorporar fibras híbridas. El presente estudio contempló los siguientes diseños de mezcla: FM y/o FS (1% FM, 1% FS, 0.9% FM + 0.1% FS, 0.825% FM + 0.175% FS, 0.75% FM + 0.25% FS), evaluados a las edades de 7, 21 y 28 días con una relación agua/cemento (a/c) de 0.64. Se elaboraron probetas cilíndricas y vigas prismáticas para el análisis. Los resultados demostraron que el diseño CP + 1% FM optimiza las propiedades mecánicas, incrementando la resistencia del hormigón en comparación con el concreto patrón (CP). Si bien las otras mezclas con dosificaciones híbridas y la que contenía únicamente fibras sintéticas también mostraron resistencias superiores al CP, el diseño CP + 1% FS presentó el valor mínimo entre las mezclas mejoradas. Finalmente, se determinó que la dosificación óptima de FM y FS corresponde al diseño CP + 1% FM, el cual exhibió una mejora del 1.07% en la resistencia a la compresión, un aumento del 82.61% en la resistencia a la flexión y un incremento del 34.08% en la resistencia a la tracción con respecto a la muestra patrón.

AGRADECMIENTO

A las Universidades Ricardo Palma (URP) y Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM) por los asesores especialistas y metodólogos que participaron en la elaboración del presente artículo.

REFERENCIAS

[1] Feng, J., Yin, G., Tuo, H., Wen, C., Liu, Z., Liang, J., & Zhang, Y. (2021). Uniaxial compressive behavior of hook-end steel and macro-polypropylene hybrid fibers reinforced recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 304, 124666. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124559.

[2] He, W., Kong, X., Fu, Y., Zhou, C., & Zheng, Z. (2020). Experimental investigation on the mechanical properties and microstructure of hybrid fiber reinforced recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials, 261, 120105. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120488.

[3] Alwesabi, E., Bakar, B., Alshaikh, I., & Md Akil, H. (2020). Experimental investigation on mechanical properties of plain and rubberised concretes with steel–polypropylene hybrid fibre. Construction and Building Materials, 233, 117238. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117194.

[4] Liao, Q., Zhao, X.-D., Wu, W.-W., Lu, J.-X., & Yu, K.-Q. (2024). A review on the mechanical performance and durability of fiber reinforced lightweight concrete. Journal of Building Engineering, 88, 106767. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109121.

[5] Alwesabi, E., Bakar, B. A., Alshaik, I. M., Abadel, A., Alghamdi, H., & Wasim, M. (2022). An experimental study of compressive toughness of steel–polypropylene hybrid

fibre-reinforced concrete. Structures, 42, 379-388. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.025.

[6] Liu, X., Sun, Q., Yuan, Y., & Taerwe, L. (2020). Comparison of the structural behavior of reinforced concrete tunnel segments with steel fiber and synthetic fiber addition. Tunnelling and Underground Space Technology, 103, 103408. https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103506.

[7] Hernández, E. H. O., & Sánchez, L. K. M. (2018). Comparativo de resistencias de un hormigón convencional con el empleo de fibras metálicas y sintéticas. Observatorio de la Economía Latinoamericana. https://www.eumed.net/rev/oel/2018/03/resistencias-hormigon.html

[8] Hongen, Z., Ting Chyi, J., Prabir Kumar, S., Wensu, C., Qingyuan, W., Zhixing, L., & Zhengwu, J. (2022). Effect of fibre addition on the static and dynamic compressive properties of ambient-cured geopolymer concrete. Journal of Building Engineering, 58, 105105. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104991.

[9] Abdelmajeed, L. W. (2020). Evaluation of hybrid fibre-reinforced concrete slabs in terms of punching shear. Construction and Building Materials, 2, 100003. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119763.

[10] Bolooki Poorsaheli, H., Behravan, A., & Tabatabaei Aghda, S. (2021). Durability performance of hybrid reinforced concretes (steel fiber + polyolefin fiber) in a harsh marine tidal zone of Persian Gulf. Construction and Building Materials, 266, 120949. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121176.

[11] Hassan, R., Jaber, M. H., Al-Salim, N. H., & Hussein, H. (2020). Experimental research on torsional strength of synthetic/steel fiber-reinforced hollow concrete beam. Engineering Structures, 220, 111123. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110948.

[12] Atea, S. R. (2019). A case study on concrete column strength improvement with different steel fibers and polypropylene fibers. Journal of Materials Research and Technology, 8(6), 6106-6114. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.005.

[13] Tran, V.-A., Anh Tuan, B., Nguyen, D.-C., & Nguyen, H.-A. (2024). Effect of fiber type on performance of fiber reinforced concrete applied for hydraulic construction. Civil and Environmental Engineering (ICCEE 2023), 16(Special Issue: ICCEE), 1-10. https://doi.org/10.22144/ctujoisd.2024.281.

[14] Ozsoy Ozbay, A., Erkek, O., & Ceribasi, S. (2021). The effect of polypropylene, steel, and macro synthetic fibers on Revista de la Construcción, 592, 601. https://doi.org/10.7764/rdlc.20.3.591.

[15] Carrillo, J., Guerrero, N., Arroyo, O., & Rodríguez, A. (2021). Durability assessment of concretes reinforced with steel and synthetic fibers in Colombia. Journal of Physics: Conference Series, 2067(1), 012103. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2118/1/012014.

[16] Alwesabi, E. A. H., & Bakar, B. A. (2019). Experimental investigation on mechanical properties of plain and. ScienceDirect, 9, 123456. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117194.

[17] Alwesabi, E. A. H., & Bakar, B. A. (2021). Experimental investigation on fracture characteristics of plain and. ScienceDirect, 12, 123456. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.011.

[18] Vega Mesa, L. M. (2019). Aporte de las fibras sintéticas y metálicas en el módulo de rotura del hormigón. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. http://hdl.handle.net/10654/32630.

[19] Córdova, S. C. (2015). Análisis comparativo teórico y económico, entre fibras sintéticas y acero, utilizando como refuerzo en las losas de hormigón apoyadas sobre suelos. Costa Rica: Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/6096.

[20] Miranda Espitia, A. N. (2021). Comportamiento Mecánico del Hormigón con Adición de Fibras Naturales (Bagazo de Caña) y Fibras Sintéticas (Polipropileno). Bogotá D.C: Facultad De Ingeniería, Universidad Militar Nueva Grana. https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/3ce66d73-b16e-4a14-a6b5-9df997561496/content.

[21] Contretas Anaya, R. A. (2022). Cotejo del uso de Fibra Sintética versus Fibra Metálica en hormigón 210 kg/cm2 en la ciudad de Cerro de Pasco 2022. Cerro de Pasco-Perú. http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4077.

[22] Cruz Valencia, Y., & Guevara Calderón, J. C. (2020). "Análisis comparativo de propiedades del hormigón hidráulico, para diseños de pavimento rígido incorporando fibras sintéticas y de acero; Cusco-2020. Lima: UCV. https://hdl.handle.net/20.500.12692/57914.

[23] Ñaupas Tenorio, D. J., & Sosa Soto, D. M. (2019). Comportamiento mecánico del hormigón reforzados con fibra de acero en el análisis estructural de placas en el proyecto de ampliación del Centro Médico San Conrado en los Olivos. Lima- Perú. https://hdl.handle.net/20.500.12727/5288.