

Comparative Model of the Physical-Mechanical Properties of Shotcrete with content of steel fibers and polypropylene used in the support of underground mining operations in Peru

Hidalgo Aguirre–Braggiant, BSc¹, Chelin Martinez–Odalis, BSc¹, Humberto Pehovaz-Alvarez, PhD¹, Carlos Raymundo, PhD¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, u201410260@upc.edu.pe, u201422136@upc.edu.pe, pcgmhpeh@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract– In the underground mining of Peru, the most used support is shotcrete, due to its effectiveness against the stability of rocky massifs; however, it can present difficulties due to the natural aggressive agents of a mine, which results in a low support resistance. This research presents the study on the resistance of shotcrete when applying polypropylene fibers and steel fibers as reinforcing agent in an underground mine located in the province of Santander, Colombia. The reinforcement materials were chosen for their application in other countries, achieving improvements in the support capacity in underground workings. The application of Sika polypropylene fibers, in a curing time of 7, 14 and 28 days obtained results of 257.02kg/cm², 293.58kg / cm² and 342.25kg / cm² respectively. On the other hand, the application of Dramix steel fibers, in a curing time of 7, 14 and 28 days, obtained results of 215.0kg / cm², 301.42kg / cm² and 346.05kg / cm² respectively. In this sense, it is evident that shotcrete reinforced with both fibers is favorable for use in underground mining in work with the presence of water and a high presence of stress. However, for the effectiveness of this proposal, the scenario where it will be applied must be analyzed.

Keywords-- Shotcrete, polypropylene fibers, steel fibers, compressive strength.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.583>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

Modelo Comparativo de las Propiedades Físico-Mecánicas del Shotcrete con contenido de fibras de acero y polipropileno empleado en el sostenimiento de labores mineras subterráneas del Perú

Hidalgo Aguirre–Braggiant, BSc¹, Chelin Martinez–Odalis, BSc¹, Humberto Pehovaz-Alvarez, PhD¹, Carlos Raymundo, PhD¹

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, u201410260@upc.edu.pe, u201422136@upc.edu.pe, pcgmhpeh@upc.edu.pe, carlos.raymundo@upc.edu.pe

Abstract–*En la minería subterránea del Perú, el sostenimiento más usado es el shotcrete, debido a su efectividad ante la estabilidad de macizos rocosos; sin embargo, puede presentar dificultades debido a los agentes agresivos naturales de una mina, lo que trae como consecuencia una baja resistencia de soporte. Esta investigación presenta el estudio sobre la resistencia del shotcrete al aplicar fibras de polipropileno y fibras de acero como agente de refuerzo en una mina subterránea ubicada en provincia de Santander, Colombia. Los materiales de refuerzo se escogieron por su aplicación en otros países, logrando mejoras en la capacidad de soporte en labores subterráneas. La aplicación de las fibras de polipropileno Sika, en un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días obtuvo resultados de 257.02kg/cm², 293.58kg/cm² y 342.25kg/cm² respectivamente. Por otro lado, la aplicación de las fibras de acero Dramix, en un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días obtuvo resultados de 215.0kg/cm², 301.42kg/cm² y 346.05kg/cm² respectivamente. En ese sentido, se evidencia que el shotcrete reforzado con ambas fibras es favorable para el uso en minería subterránea en labores con presencia de agua y alta presencia de esfuerzos. Sin embargo, para la efectividad de esta propuesta se debe analizar el escenario donde será aplicado.*

Keywords– Shotcrete, fibras de polipropileno, fibras de acero, resistencia a la compresión.

I. INTRODUCCIÓN

Los problemas de durabilidad y resistencia en el shotcrete han aquejado al sector minero, específicamente aquellos que desarrollan trabajos mineros subterráneos, hasta la fecha se vienen realizando estudios e investigaciones con el fin de reducir el impacto de la pérdida de durabilidad del concreto [1]. Es así, que en distintos países del mundo, estas dos características del shotcrete implican un amplio campo de investigación, por lo que se han realizado grandes contribuciones tecnológicas en los últimos años [1]. Asimismo, el problema de la disminución de durabilidad y baja resistencia no solo está presente en el extranjero sino también en territorio nacional, ya que se ha evidenciado desprendimientos en labores subterráneas sostenidas con concreto lanzado, debido a los grandes esfuerzos producidos por las grandes cargas de esfuerzo en combinación con agentes químicos y físicos propios de labores mineras subterráneas. [2]

La importancia del problema radica en que se pone en peligro la calidad del shotcrete utilizado en la construcción del

sostenimiento, debido a la reducción de la resistencia del concreto, dando lugar al incremento de los costos por buscar otras herramientas que brinden soporte a la infraestructura a grandes profundidades. Actualmente, no existe material a base de cemento que sea el adecuado para soportar las condiciones agresivas atribuidas a trabajos subterráneos. Por ello, existe una gran demanda de nuevos materiales o compuestos que ofrezcan que la durabilidad y resistencia se incrementen a pesar de este tipo de ambiente, garantizando el control de la pérdida de ambos aspectos [3]. En ese contexto, se han hecho grandes contribuciones, pues diferentes autores han logrado mejorar el rendimiento del shotcrete incorporando diferentes materias primas, como lo son bacterias, sulfato de calcio, fibras metálicas, fibras de acero, sílice, nano sílice, entre otras más, las cuales han sido producto de estudio con resultados favorables que proporcionan el incremento de resistencia y durabilidad del concreto lanzado utilizado en minería subterránea de distintas partes del mundo. [4] [5] [6] [7] [8].

La principal motivación de la investigación, es realizar una comparación sobre el rendimiento de dos tipos shotcrete, una con incorporación de fibras de acero y otra con adición de fibras de polipropileno, con el objetivo de analizar el grado de influencia que poseen las fibras para la mezcla de concreto lanzado a la hora de que sea sometido a grandes cargas.

II. ESTADO DE ARTE

La comparación de las propiedades físico – mecánicas de los tipos de shotcrete con adición de fibra, en escenarios donde se desarrolla o trabaja minería subterránea es importante. Debido, que para trabajos de profundidad, se determina el tipo de sostenimiento con shotcrete convencional a través de métodos empíricos. [9][10]. Por ello, la comparación de aditivos como lo son las fibras, dan un soporte actual y recomendado para contrarrestar la inestabilidad del concreto lanzado por la pérdida durabilidad y baja resistencia, también permite tener una respuesta ante los diferentes ataques físicos u químicos que afectan el rendimiento del concreto lanzado, pues se tendría una estrategia para mejorar su vida útil [10] [11]. Las propiedades mecánicas del shotcrete serán mejor comprendidas con un estudio comparativo, que servirá de evidencia como elección a la mejor opción de fibra para

labores temporales o permanentes [12] [13], por lo que es importante realizar el análisis una vez se cumplan los 28 días de curado, tiempo en el cual el desempeño será óptimo.

En primer lugar, el hormigón reforzado con fibra de polipropileno, suele mostrar mejoras considerables en la durabilidad, capacidad de deformación, tenacidad y control de fisuras, estas son algunas de las principales propiedades que pueden mejorarse mediante la adición de fibras, esto ocurre por el efecto puente que promueven las fibras, deteniendo y controlando las grietas, reduciendo la concentración de tensiones alrededor de las grietas. [14][15], relativamente es estable en ambientes grescos con retención de agua hasta un 10%, puesto que reduce la contracción plástica optimizando la matriz, mejorando la impermeabilidad y propiedades del hormigón proyectado. Estudios relacionados sobre este tipo de fibras sintéticas, han demostrado la mejora en la resistencia, endurecimiento y modulo elástico del concreto, de acuerdo a la cantidad y longitud de fibra permitiendo su aplicación en túneles y galerías de proyectos mineros, si bien la relación óptima de fibra oscila entre 0.25% y 0.9%, es importante escoger el valor correcto, con el objetivo de detener el deterioro del hormigón y protegerlo de la corrosión producto de las condiciones climáticas severas. [16] [17]. Es así, que uso de fibras de polipropileno llega a mejorar el concreto, reduciendo el rebote que causa pérdida de fibra y engrosamiento de la capa de hormigón. [16][18]

En segundo lugar, el concreto reforzado con fibra de acero, compensa inconvenientes con el soporte, brindando no solo resistencia a duras condiciones ambientales sino también la capacidad de absorción de energía, debido a que las tensiones de tracción inducidas al hormigón proyectado son transferidas a las fibras gracias a la característica de unión duradera entre cemento y acero, esta adherencia mejora el anclaje mecánico, por lo que debe tener una alta resistencia con el objetivo garantizarla la eficiente transferencia de carga [19][20], también las fibras de acero pueden retrasar el tiempo de fisuración inicial y aumentar la carga de la primera fisura y la deflexión del hormigón en la primera fisura al mejorar su estructura interna. Asimismo, el aumento del contenido de fibra de acero en las mezclas de hormigón aumenta la interacción de energía, superando limitaciones y mejorando su resistencia, por lo que su efectividad se le atribuye a la capacidad de atravesar la superficie de falla. Además, estudios sobre este tipo de fibra, demostraron la importancia de la orientación luego del punto de rotura. Es así, que, para ambientes subterráneos, la adición de fibras de acero en el concreto mejora el rendimiento de la resistencia aun en ambientes de heladas o sulfatadas, evitando el desdoblamiento del shotcrete a edades tempranas. [21] [22]

III. APORTE

El modelo propuesto, está desarrollado en base al modelo comparativo y lineamientos de la American Concrete Institute (ACI), en donde se mencionan los valores máximos permisibles que se debe tener en cuenta durante el diseño y

elaboración de concreto, imprescindible para la comparación de las propiedades mecánicas del shotcrete, y su posterior análisis [23]. Asimismo, en los siguientes párrafos se detallarán los cálculos de cantidad de material en base a las tablas de la ACI 211, como también información de cada herramienta o insumo utilizado para el diseño de esta investigación.

A. Selección de Materiales

Los materiales incluidos en el concreto tienen el objetivo de modificar el comportamiento físico y químico de la mezcla. Por ello, se seleccionaron los siguientes materiales:

- **Cemento:** Se utilizó cemento IP, el cual cumple con los requerimientos establecidos en la norma ASTM C-595.
- **Agregado Fino:** El agregado fino utilizado fue extraído de la cantera de MUSA.
- **Agregado Grueso (Grava):** Se utilizaron los agregados provenientes de la cantera MUSA, el tamaño estándar del agregado grueso se ciñe a la gradación N° 67 (ASTM C 33).
- **Agua**
- **Fibras de acero:** Las fibras metálicas que se utilizaron fueron las SIKAFIBER CHO 65/35 NB.
- **Fibras de polipropileno:** Las fibras sintéticas que se utilizaron fueron las Sika Fiber PP 48.

TABLA I
PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES A UTILIZAR

Elemento	P.esp. Seco Kg/m3	P. Unitario Kg/m3	M.F	Absorción %	Humedad %
Cemento	3150	1400			
Arena	2700	1600	2.84	2.3	5.1
Grava	2600	1550	3/8"	1.1	0.3
Agua	1000				
Fibra de Acero	7850				
Fibra de Polipropileno	910				

Con la información de cada material, se procede a medir y calcular la cantidad necesaria de cada uno. Por ello, se utilizarán las tablas del comité ACI 211 y los criterios establecidos por la ACI 506 R.

B. Diseño de Mezcla

1) Primer Paso

Se estima la cantidad de agua/m3 y el % de aire. Para ello, se emplea la Tabla ACI 211. Según la Guide ACI 506 R, para el diseño de concreto lanzado, se debe manejar un slump de 3 a 4 y el tamaño máximo de agregado debe ser de 3/8"

$$\text{Slump} = 4 \text{ y T.M} = 3/8''$$

TABLA II
CANTIDADES APROXIMADAS DE AGUA PARA DIFERENTES SLUMP

Slump	Tamaño máximo del agregado							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	4"
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	0
% Aire Incorporado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

Con ayuda de la tabla del Comité ACI 211, se estima la cantidad de agua/m³ y el % de aire.

$$\text{Agua} = 228 \text{ Kg/m}^3 \quad \text{Aire} = 3\%$$

2) Segundo Paso

Se establece una relación de agua/cemento y se calcula la cantidad de cemento en Kg. Para el diseño del concreto lanzado, la relación de agua/cemento es por lo general 0.4, con el objetivo de que la resistencia sea mayor.

Asimismo, la ACI 506 R sostiene que un buen diseño de concreto lanzado requiere una cantidad de cemento de 360 a 500 kg/m³. Para ello, se utilizará la Tabla del Comité ACI 211.

TABLA III
RELACIÓN AGUA Y CEMENTO PARA TIPO DE SHOTCRETE

Condiciones de exposición	Relación w/c máxima, en agregados de peso normal	Resistencia en compresión mínima en concretos con agregados livianos
Concreto de baja permeabilidad		
a. Expuesto a agua dulce	0.50	260
b. Expuesto a agua de mar o aguas solubles	0.45	
c. Expuesto a la acción de aguas cloacales	0.45	
Concretos expuestos a procesos de congelación y deshielo en condiciones húmedas		
a. Bardineles, cunetas, secciones delgadas	0.45	300
b. Otros elementos	0.50	
Protección contra la corrosión de concreto expuesto a la acción de agua de mar, aguas salubres, neblina, o rocío de estas aguas	0.40	325
Si el recubrimiento mínimo se incrementa en 15 mm	0.45	300

Como tenemos la relación de agua/cemento = 0.4. Se procede con lo siguiente:

$$\text{Cemento en Kg} = \frac{\text{Agua en Kg}}{\text{Cemento}}$$

3) Tercer Paso

Se establece el porcentaje de dosificación de arena y grava. Para ello, recurrimos a la Tabla del Comité ACI 211.

$$\begin{aligned} \text{Tamaño Máximo} &= 3/8'' \\ \text{Módulo de Fineza} &= 2.8 \end{aligned}$$

El coeficiente establecido es 0.46, por lo que el volumen absoluto se calcula multiplicando el coeficiente por el peso unitario en seco de la piedra y dividiendo por su peso específico.

TABLA IV
COEFICIENTE DE GRAVE

Tamaño máximo del agregado	Volumen de agregado grueso compactado en seco para diversos módulos de fineza de la arena			
	2.4	2.6	2.8	3
3/8 "	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2 "	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4 "	0.66	0.64	0.62	0.6
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2 "	0.75	0.73	0.71	0.69
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.82	0.79	0.78	0.75
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

C. Preparación y Mezcla

En primer lugar, se verificará que todos los instrumentos necesarios mencionados se encuentren calibrados y en buenas condiciones para realizar la preparación (Fig. 2). Debido a que el diseño de mezcla es susceptible a factores como temperatura, ventilación y tiempo. Los instrumentos que se utilizaron fueron: varilla de apisonadora, carretilla, espátula, martillo de goma, cucharón de acero y 12 moldes de probetas de policarbonato de 8"x4". Se procederá a preparar 6 probetas por cada mezcla con adiciones de fibra, con el objetivo de obtener dos muestras para cada día de ensayo.

Posteriormente, para evitar la distribución desigual y la aglomeración de los insumos, debido a que se trabaja con fibras, se optará por el método de "primero seco, luego húmedo". Por ello, primero se mezclará en seco durante 3 minutos las proporciones de cemento Portland, arena, grava y las respectivas fibras (Fig. 3). Transcurrido el tiempo se le adicionará el agua y se seguirá mezclando por otros tres minutos, hasta que todos los componentes se logren incorporar correctamente a una mezcla homogénea.

Después, se seguirá con el vaciado a las probetas con ayuda de los instrumentos. Así mismo, el llenado de la probeta se realizará en tres capas, cada una de 10 cm de altura aproximadamente. Con ayuda del cucharón, cogemos una cantidad de la mezcla y la vaciamos en la probeta. Luego

buscamos compactar la primera capa alrededor de todo el molde, para esto hacemos 25 inserciones con la varilla de apisonadora. Después de la compactación de esta capa, se golpea ligeramente alrededor del molde unas 10 veces con el martillo de goma para liberar las burbujas de aire que hayan podido quedar atrapadas en el interior. Este proceso se repite 3 veces hasta llegar a tener el molde lleno. Llenas las 12 probetas, se procede a dejarlas reposar 24 horas como máximo (esto proceso es conocido como tiempo de curado), esto para que logren fraguar y poder ser transportadas al laboratorio (Fig. 4).

Finalmente, una vez secas las mezclas en las probetas, se les colocará un nombre o distintivo para que se logren diferenciar en el proceso de los ensayos (Fig. 5).



Fig. 1 Instrumentos para la elaboración de la mezcla



Fig. 2 Mezcla de los materiales secos



Fig. 3 Proceso de curado de las probetas



Fig. 4 Dos grupos de probetas marcadas con un distintivo.

D. Ensayos de laboratorio

La realización de las probetas nos dará paso para proceder con los ensayos de laboratorio. Dos grupos de probetas, compuestas por seis probetas con la incorporación de fibras de polipropileno y seis probetas con la incorporación de fibras de acero, se someterán a cargas en donde se obtendrá finalmente la resistencia a la compresión de cada una de ellas, este proceso de someter cargas en un solo sentido a un cuerpo es conocido como ensayos de compresión uniaxial (UCS) (Fig 6.). Las probetas deberán ser ensayadas en tres periodos, a las 7, 14 y 28 días de curado.



Fig. 5 Ensayo de resistencia a la compresión antes y después de la rotura.

IV. VALIDACIÓN

A. Escenario de Validación

El proyecto Unión Norte está ubicado en la provincia de Santander, Colombia. Contempla un gran potencial de oro, encontrándose en fase de exploración. Actualmente, tiene construido un túnel de acceso de aproximadamente 150 m de longitud con una sección de 6 x 6 metros llamado “El Emboque”.

La expansión del túnel de exploración, ramal izquierdo, ramal derecho y ramal central será excavada en las unidades litológicas gneis y brecha mineralizada. El ramal central será excavado 54% en gneis y 46 % en brecha mineralizada; el ramal izquierdo será excavado en su totalidad sobre brecha mineralizada; y el ramal derecho será excavada 95% en gneis y contará con pequeños cuerpos mineralizados, un 5% de brecha mineralizada en total.

La brecha mineralizada está asociada al sistema de fallas de NE-SO y controlada por la falla regional La Baja. Los geólogos de MINETU han denominado estas estructuras brechadas como la veta La Mascota y Gigante

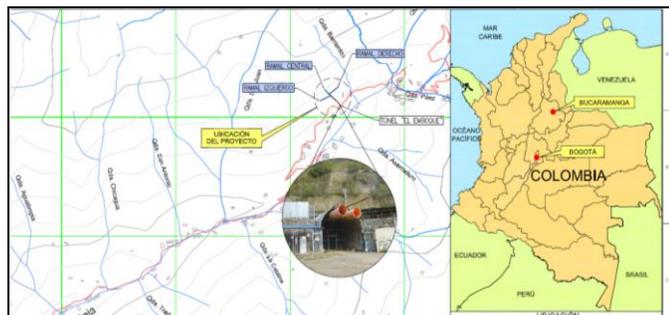


Fig. 6 Ubicación del Proyecto

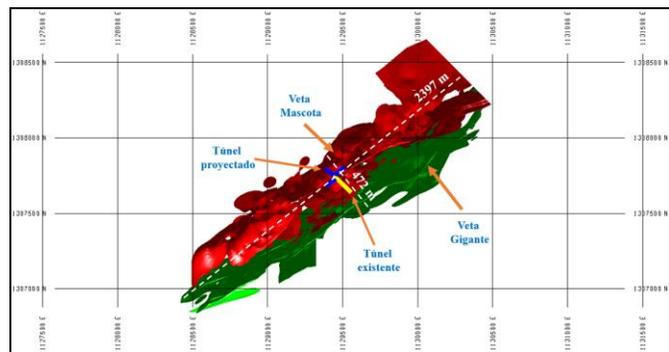


Fig. 7 Principales vetas del proyecto

B. Diseño de Validación

Se realiza un balance de pesos y volúmenes, la tabla 6, desarrolla el balance de materiales, se ejecuta la suma de los volúmenes de agua, cemento, aire y agregado grueso, cuyo resultado será restado a 1 m³, el resultado nos dará el volumen de agregado grueso, que será multiplicado por su densidad de 2700 kg/m³, teniendo como resultado 853.80 kg de agregado fino.

TABLA V

BALANCE PESO Y VOLUMEN DE CADA ELEMENTO PARA 1 M³ DE CONCRETO LANZADO

ELEMENTO	PESO EN KG	VOLUMEN EN M3
Agua	228.00	0.22800
Cemento	570.00	0.18095
Aire	0.00	0.00059
Agregado Grueso	713.00	0.27423
		0.68378
Agregado Fino	$0.31622 \cdot 2700 = 853.80$	$1 - 0.68378 = 0.31622$
		1.00000

Ya obtenida la dosis de cada material, se procede con el diseño para cada tipo de fibra.

Para el diseño, se tiene en cuenta que por 1m³ de concreto lanzado se utiliza 50 kg de fibras de acero, ya que es la que proporciona mejores niveles de resistencia a las condiciones subterráneas. Por otro lado, la proporción de fibra de polipropileno será de 0.9% por 1m³, los porcentajes de fibra de polipropileno pueden ir de 0.3% a 1%, se escogió 0.9% para que el concreto tenga mayor resistencia a las condiciones subterráneas.

TABLA VI

MEZCLA DE 1 M³ DE CONCRETO CON AGREGADO DE FIBRAS DE ACERO

ACERO		
ELEMENTO	PESO EN KG/M3	VOLUMEN EN M3/M3
Agua	228.00	0.22800
Cemento	570.00	0.18095
Aire		0.03000
Agregado Grueso	713.00	0.27423
Fibra de Acero	50.00	$50.0/7850.0 = 0.00637$
		0.71955
Agregado Fino	$0.28045 \cdot 2700 = 757.21$	$1 - 0.71955 = 0.28045$
		1.00000

Quinto Paso

Listas las dosificaciones para 1m³ de concreto lanzado con fibras de acero y fibras de polipropileno, se procede hacer los cálculos específicos. Se contarán con 12 probetas, cada mezcla con su respectiva fibra utilizará 6 probetas. Por lo que ahora se debe calcular la cantidad de insumos para el volumen de 6 probetas. A continuación, se procede a calcular el volumen de acuerdo a las dimensiones de las probetas (Fig. 10).

TABLA VII

MEZCLA DE 1 M³ DE CONCRETO CON AGREGADO DE FIBRAS DE ACERO

POLIPROPILENO		
ELEMENTO	PESO EN KG/M3	VOLUMEN EN M3/M3
Agua	228.00	0.22800
Cemento	570.00	0.18095
Aire		0.03000
Agregado Grueso	713.00	0.27423
Fibra de Polipropileno	$0.009 \cdot 910 = 8.19$	0.009
		0.72218
Agregado Fino	750.11	$1 - 0.72218 = 0.27782$
		1.00000

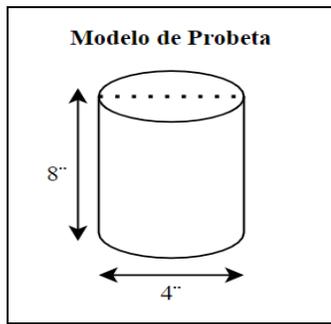


Fig. 8 Dimensiones de la probeta

TABLA VIII
DIMENSIONES DE LAS PROBETAS

	Pulgadas	Metros
Altura	8	0.2032
Diámetro	4	0.1016

Conocidas las dimensiones de las probetas, se sigue con el cálculo del volumen:

$$\text{Volumen de 1 Probeta} = \pi * \left(\frac{0.1016}{2}\right)^2 * 0.2032$$

$$\text{Volumen de 1 Probeta} = 0.001647407 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de 12 Probetas} = 0.001647407 * 12$$

$$\text{Volumen de 12 Probetas} = 0.019768888 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de 6 probetas de Fibras de Acero} \\ = \frac{0.019768888}{2} = 0.009884444 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Vol. 6 probetas de Fibras de Polipropileno} \\ = \frac{0.01976888}{2} = 0.009884444 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Al conocer los volúmenes que cada mezcla ocupa, se realiza una regla de tres para estimar la cantidad de cada material que será utilizado para estos ensayos con respecto a las dosis involucradas para un 1m³ de concreto lanzado.

TABLA IX
MEZCLA DE 0.0098844 M³ DE CONCRETO LANZADO CON FIBRA DE ACERO

ELEMENTO	PESO EN KG	VOLUMEN EN M3
Agua	2.254	0.0022537
Cemento	5.634	0.0017886
Aire		0.0002965
Agregado Grueso	7.048	0.0027106
Fibra de Acero	0.494	6.296E-05
		0.0071124
Agregado Fino	7.485	0.0027721
		0.0098844

TABLA X
MEZCLA DE 0.0098844 M³ DE CONCRETO LANZADO CON FIBRA DE POLIPROPILENO

ELEMENTO	PESO EN KG	VOLUMEN EN M3
Agua	2.254	0.0022537
Cemento	5.634	0.0017886
Aire	0.000	0.0002965
Agregado Grueso	7.048	0.0027106
Fibra de Polipropileno	0.081	8.896E-05
		0.0071384
Agregado Fino	7.414	0.0027461
		0.0098844

Los presentes ensayos presentados a continuación, pretenden resaltar las ventajas de cada tipo de fibra en estudio. Con el objetivo de ofrecer un mejor panorama, con el tema del uso de fibras para túneles subterráneos, puesto que existen labores temporales y permanentes.

Los resultados que se obtuvieron, fueron según los intervalos de tiempo pre-dispuestos por cada conjunto de probeta. Es así, que este fue el cronograma de ensayos.

TABLA XI
CRONOGRAMA DE ENSAYOS

Periodo (Días)	Prob. Acero	Prob. Polipropileno
7	7	A
14	14	B
28	28	C

- **Para los 7 días de curado:** Se ensayaron las probetas “7” y “A”, de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA XII
RESULTADOS A LOS SIETE DÍAS DE CURADO

Probeta	Carga Total (Kg)	Carga Máxima (KN)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo Real (Kg/cm ²)	% Llegado	fc (diseño)
7	20591.72	201.94	25.20	257.02	107.09%	240
A	17242.96	169.10	21.11	215.00	89.58%	240

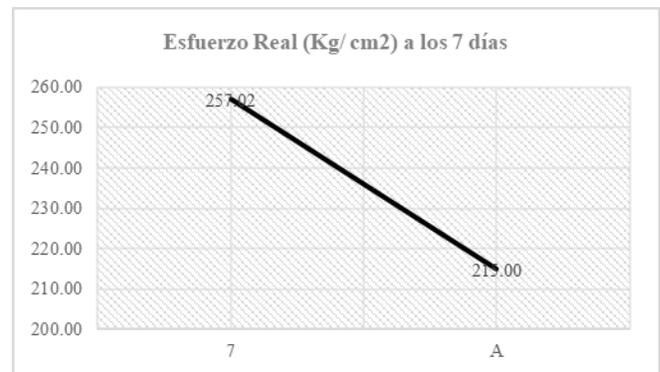


Fig. 9 Esfuerzp Real a los 7 días

En los primeros siete días, se observó que el concreto con incorporación de fibra de acero gana más resistencia a comparación de la mezcla con incorporación con fibra de polipropileno. Además, se observa que la mezcla con fibra de acero sobre paso la f_c de diseño.

TABLA XIII
TIPO DE FALLA A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS

PROBETA	TIPO DE FALLA
7	Columna
A	Cono y separación - Columna

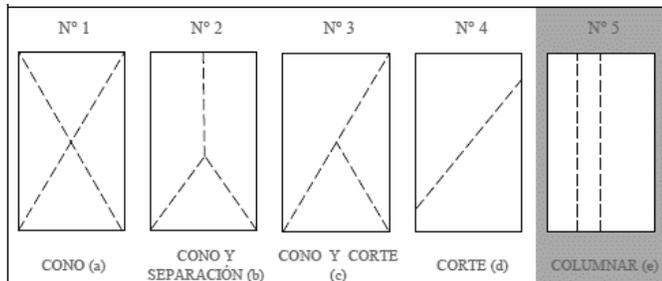


Fig. 10 Fallas adquiridas con la probeta "7" a los siete días

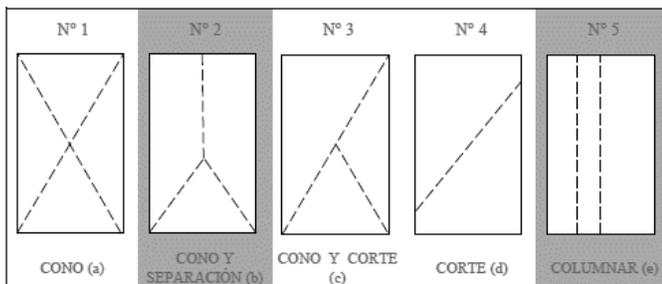


Fig. 11 Fallas adquiridas con la probeta "A" a los siete días

- **Para los 14 días de curado:** Se ensayaron las probetas "14" y "B", de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA XIV
RESULTADOS A LOS 14 DÍAS DE CURADO

Probeta	Carga Total (Kg)	Carga Máxima (KN)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo Real (Kg/cm ²)	% Llegado	f_c (diseño)
14	23521.37	230.67	28.79	293.58	122.33%	240
B	24149.52	236.83	29.56	301.42	125.59%	240

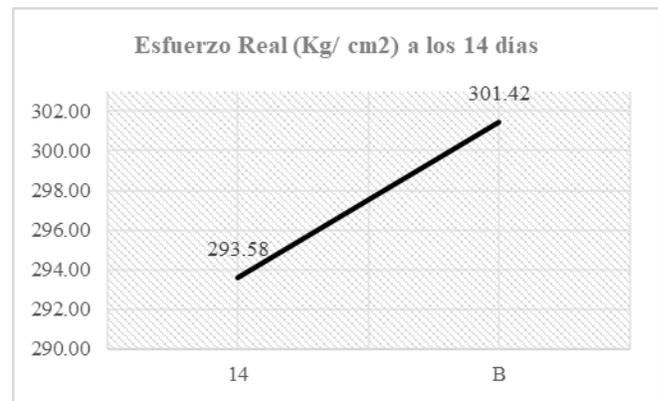


Fig. 12 Esfuerzp Real a los 14 días

En los primeros catorce días, se observó que el concreto con incorporación de fibra de polipropileno obtuvieron más resistencia, obteniendo así una ventaja considerable ante la mezcla de shotcrete con incorporación con fibra de acero. Además, se observa que la mezcla con fibra de polipropileno sobre paso la f_c de diseño general y al de acero.

TABLA XV
TIPO DE FALLA A LA COMPRESIÓN A LOS 14 DÍAS

PROBETA	TIPO DE FALLA
14	Cono y corte - corte
B	Corte

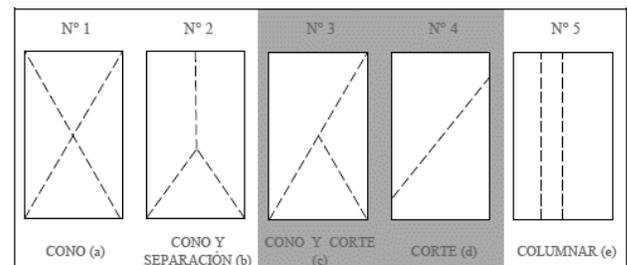


Fig. 13 Fallas adquiridas con la probeta "14" a los catorce días

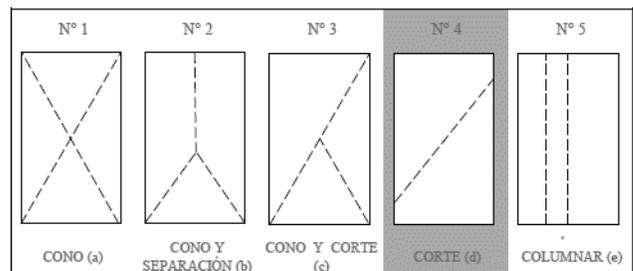


Fig. 14 Fallas adquiridas con la probeta "B" a los catorce días

- **Para los 28 días de curado:** Se ensayaron las probetas "28" y "C", de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

TABLA XVI
RESULTADOS A LOS 28 DÍAS DE CURADO

Probeta	Carga Total (Kg)	Carga Máxima (KN)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo Real (Kg/cm ²)	% Llegado	fc (diseño)
28	27420.78	268.91	33.56	342.25	142.60%	240
C	27724.66	271.89	33.94	346.05	144.19%	240

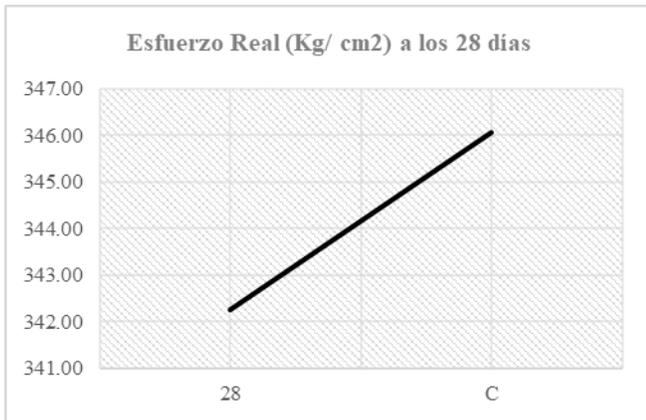


Fig. 15 Esfuerzo Real a los 28 días

TABLA XVII
RESULTADOS A LOS 28 DÍAS DE CURADO

PROBETA	TIPO DE FALLA
28	Corte
C	Cono y separación – Cono y corte

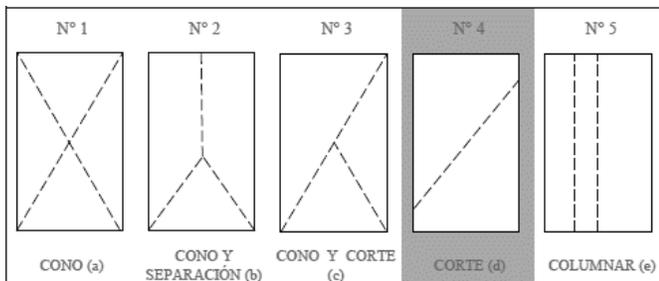


Fig. 16 Fallas adquiridas con la probeta "28" a los veintiocho días

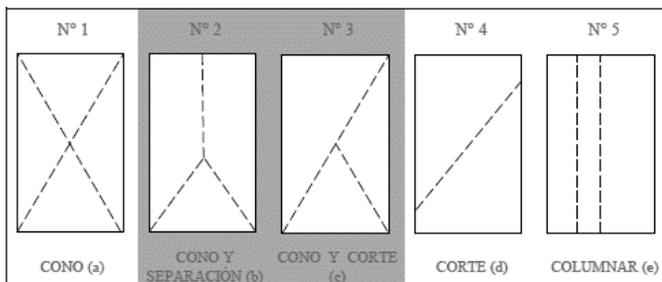


Fig. 17 Fallas adquiridas con la probeta "C" a los veintiocho días

Finalmente, en los 28 días del curado se observa que la mezcla con incorporación de fibra de polipropileno sigue

manteniendo ventaja, ya que con el transcurso de los días a ganado mayor resistencia en comparación a la mezcla con fibra de acero. Asimismo, se evidencia que la mezcla con fibra de polipropileno a los 28 días sobre paso la fc de diseño general y al de acero. Es así, que graficamos el comportamiento de ambas mezclas con las distintas adiciones de fibras, con el objetivo de que se pueda apreciar su evolución y desarrollo durante todo el periodo de días de estudio.

TABLA XVIII
TIEMPO DE CURADO SEGÚN EL TIPO DE FIBRAS

TIPO DE FIBRAS	TIEMPO DE CURADO		
	7	14	28
F. Polipropileno	257.02	293.58	342.25
F. Acero	215.00	301.42	346.05

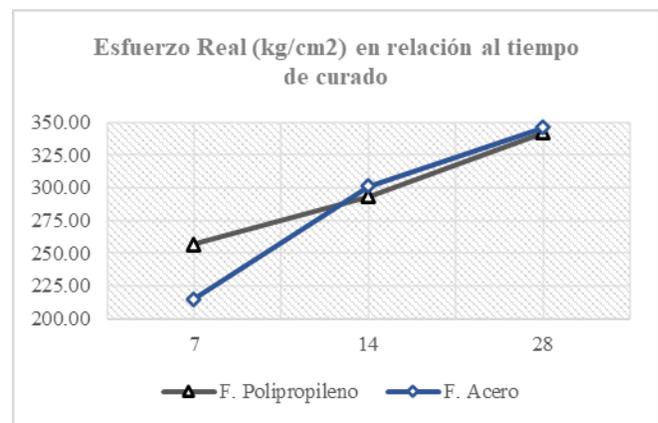


Fig. 18 Esfuerzo real en relación al tiempo de curado

V. DISCUSIONES

En el trabajo de investigación, al realizar los ensayos en los primeros siete días, se determinó que la mezcla con incorporación de fibras de acero llega rápidamente a sobre pasar la fc de diseño establecida con un valor de 257 kg/m², logrando demostrar la velocidad con la que logra mejorar la resistencia del concreto a diferencia de las fibras de polipropileno que no llegaron a la fc diseño, pues se obtuvieron un valor 215 kg/m². Este comportamiento, es similar a la del paper de [2] donde manejan grandes valores de resistencia, con ensayos a los cinco días de curado, lo cual se debe a la incorporación de fibra de acero ondulada, que es ligeramente superior al del tipo cortante recto, ya que aumenta la gradualmente la capacidad de flexión hasta un 10% disminuyendo el agrietamiento y fisuramiento del testigo.

Con los ensayos realizados a los catorce días, el panorama anterior cambio, ya que si bien es cierto con los ensayos anteriores la mezcla con incorporación de fibras de acero demostró los beneficios proporcionados rápidamente al shotcrete, los resultados después de 14 días revelaron que la

capacidad de resistencia en el caso de la mezcla con fibras de acero disminuye notablemente pues alcanzó un ligero aumento hasta los 293.58 kg/cm², mientras que en la mezcla con incorporación de fibras de polipropileno sucede todo lo contrario, ya que aumentó notablemente la resistencia del shotcrete a 301.42 kg/cm², y esto es similar al paper [24], donde en sus ensayos con probetas con adición de polipropileno a los 20 días mejoraran la resistencia, lo cual redujo las grietas en las probetas, esto se debe a que la fibras de polipropileno contribuye a la fuerza de unión entre la matriz y la fibra, lo cual permite hidratar adecuadamente y llenar una fracción significativa del espacio entre la fibra y la matriz.

Al llegar al límite de días, aproximadamente a un mes de curado, el panorama de anterior se mantiene, pues la mezcla con incorporación de fibra de acero sigue en desventaja ante la resistencia suministrada a la probeta de shotcrete con incorporación de fibras de polipropileno, ya que la probeta "28" llegó a una resistencia de 342.25 kg/cm², mientras que la probeta "C" logró un valor de 346.06 kg/cm². Por ello, se puede decir que la fibra de polipropileno logra mejorar la resistencia del shotcrete conforme pasen los días, a diferencia de las fibras de acero, que con el paso los días disminuye esta capacidad notablemente. Este comportamiento es similar a la del paper de [16], donde la observación de campo que duro 3 años, se pudo contrastar que el concreto con adición de fibra metálica mostró signos de agrietamiento y fue reparada más de una vez, mientras que el concreto reforzado con fibras de sintética permaneció intacto, debido a que no aparecen signos de agrietamiento, mostrando efectos de soporte satisfactorios, a lo que se concluyó que las fibras sintéticas proporcionan mejores valores de resistencia a largo plazo.

Conforme se dio el periodo de ensayos, la mezcla de concreto con incorporación de fibras de polipropileno, mantuvieron un comportamiento de tipo de falla a la compresión a las probetas de forma cortante, aunque en un principio fue de tipo en columna, esta fue tomando este tipo de falla, culminando el último ensayo con un tipo de falla cortante, lo cual se le atribuye a la resistencia que fue adquiriendo durante los días de curado. Asimismo, este comportamiento coincide con el paper de [2], ya que en sus ensayos, las probetas manejan una falla quebradiza cortante, debido a que las fibras de acero mejoran la resistencia de forma inmediata y disminuye la capacidad de esta conforme los días, las grietas del hormigón aparecen pero no se fracturan totalmente, por lo que la falla cortante que se observa es producto del desprendimiento del concreto por acción de las fibras de acero.

Conforme se ejecutó el periodo de ensayos, las probetas con mezcla de shotcrete con incorporación de fibras de polipropileno, desarrollaron un tipo de falla a la compresión a las probetas muy particular, de modo que adquirieron dos tipos de fallas, la de cono y separación, y la de cono y corte. Al principio de los ensayos, las probetas presentaron un tipo de falla de cono y separación, por lo que en el segundo ensayo se presentó un tipo de falla cortante, siendo el último ensayo el

resultado de ambas fallas. Asimismo, este resultado se asemeja a la del paper de [29], pues sus entre sus resultados las fallas de las muestras de relleno cementado son en forma de cono, esto se debe a que las caras de los extremos superior e inferior que reciben la presión están sustancialmente intactas con una parte media delgada, pues la presión es transportada hacia el centro por las fibras, mientras más amplia sea la longitud de las fibras, mejor será transportada la carga.

Respecto a la carga máxima (KN) aplicada a las probetas de polipropileno, se observó que alrededor de los ensayos esta carga fue incrementándose gradualmente conforme se incrementaba el tiempo de curado, a los 7 días la carga máxima fue de 201.94 KN, a los 14 días 230.67 KN y a los 28 días 268.91 KN. Así mismo, para las probetas de acero los valores de carga máxima fueron de 169.10 KN a los 7 días, a los 14 días 236.83 KN y a los 28 días 271.89 KN. Este análisis demuestra que se necesita mayor carga para las probetas de acero para llegar al punto de rotura y estos resultados se asemejan a los expuesto en la investigación acerca de la resistencia de las fibras de acero. [30]

En relación con los resultados de resistencia de las probetas con los diferentes tipos de fibra, se evidencia que si bien los valores más altos son los de las fibras de acero, esto no es un indicador de ser los más óptimo, ya que como expuso [31], para la aplicación de refuerzos en el shotcrete se debe tener en cuenta varios factores como el tipo de labor subterránea, condiciones geomecánicas y geotécnicas, presencias de aguas, entre otros.

VI. CONCLUSIONES

La adición de fibras a la mezcla de concreto logró un incremento en el porcentaje de resistencia a la compresión, ya que la ganancia de resistencia de las muestras reforzadas con fibras mostró una tendencia creciente a medida que el tiempo de curado aumenta, lo que demuestra que la incorporación de fibras metálicas como sintéticas favorecen el rendimiento del shotcrete.

Las fibras demostraron buenas acciones inhibitoras con respecto a la fisuración y rotura, pues no permitieron la propagación de grietas, mejorando la capacidad de distribución de carga, viéndose reflejado en los tipos de rotura que presentaron cada de una de ellas, pues las fibras de polipropileno mantuvieron una tendencia de rotura de cono y separación, siendo evidente que desde un principio lograron disipar las cargas, mientras que las fibras de acero empezaron con una rotura en columnas, finalizando con una rotura de corte, por lo que se puede decir que tuvo un avance progresivo con respecto a la distribución de esfuerzos.

La velocidad con la que se incrementa la resistencia a la compresión es distinta para cada tipo de fibra, pues las fibras de polipropileno incrementan gradualmente la resistencia del shotcrete, volviéndolo trabajable en un periodo de aproximadamente 2 semanas, no obstante, esta resistencia sigue aumentando. Por otro lado, las fibras de acero incrementan de manera inmediata la resistencia del shotcrete,

pero luego de sobrepasar la fuerza de diseño, la resistencia que proporcionaba a la mezcla empieza a ser cada vez menor. Por lo que se puede decir, que con el pasar de los días la resistencia de la mezcla con fibras de polipropileno aumenta, mientras que la mezcla con adición de fibras de acero disminuye la resistencia que proporciona al shotcrete.

La mezcla con incorporación de fibra de polipropileno es aquella que muestra mejores ventajas a la minería subterránea del Perú, ya que sus propiedades cubren los temas de agua ácida y fuerzas de compresión a la que el macizo rocoso es sometido. No obstante, las fibras de acero pueden aplicarse a labores temporales que se encuentren más cerca de la superficie, mientras que la fibra de polipropileno puede aplicarse en labores permanentes a grandes profundidades.

REFERENCIAS

- [1] I. Galant, A. Baldermann, W. Kusterle, M. Dietzel y F. Mittermayr, «Durability of shotcrete for Underground support - Review and update,» *Construction and Building Materials*, vol. 202, n° 202, pp. 465-493, 2019.
- [2] Z. J. P. L. L. M. Z. Z. D. Z. F. T y C. J. Z., «FLEXURAL FRACTURE TOUGHNESS AND FIRST-CRACK STRENGTH TESTS OF STEEL FIBER-SILICA FUME CONCRETE,» *Strength of Materials*, vol. 50, n° 1, pp. 166-175, 2018.
- [3] G. Isabel, B. Andre, K. Wolfgang, D. Martin y M. Florian, «Durability of shotcrete for underground support- Review and update,» *Construction and Building Materials*, vol. 202, n° 1, pp. 465-493, 2019.
- [4] K. Hamid y B. Raheb, «Application of carbonate precipitating bacteria for improving properties and repairing cracks of shotcrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 148, n° 1, pp. 249-260, 2017.
- [5] Y. H. W. L. L. W. V y P. Y., «Effects of fibers on expansive shotcrete mixtures consisting of calcium sulfoaluminate cement, ordinary Portland cement, and calcium sulfate,» *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. XXX, n° 1, pp. 1-10, 2018.
- [6] L. L. C. Z. J. Y. Z. J y K. A. K. H., «Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect,» *Construction and Building Materials*, vol. 168, n° 1, pp. 622-632, 2018.
- [7] M. Hisatake, «Effects of steel fiber reinforced high-strength shotcrete in a squeezing tunnel,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 18, n° 1, pp. 197-204, 2003.
- [8] W. J. Ping, F. Jiang Hua, P. Jian Yong, S. Qiang y X. Xiang, «Experimental Study and Engineering Application of Polypropylene Fiber Shotcrete for Bored Tunnels in Water Rich Strata,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, pp. 8655-8666, 2020.
- [9] R. Hefeezur, M. N. Abdul, K. Jung-Joo y Y. Han-Kyu, «The primary output of the rock mass rating (RMR) and tunneling quality index (Q) system is a preliminary tunnel support design, as these methods are empirically developed and updated for this purpose. In this study, these internationally accepted design tool,» *Department of Civil and Environmental Engineering*, vol. 55, pp. 426-450, 2018.
- [10] K. L. A. S. Yu. N. y S. D. A., «Improvement of Support Technology in Artemevsk Mine of Vostoksvetmet,» *Mineral Mining Technology*, vol. 56, n° 6, pp. 140-148, 2017.
- [11] I. Mirko, B. Mile y S. Seas, «TEHNOLOGIJA UGRADNJE PRSKANOG BETONA KOD PODGRAĐIVANJA,» *KOMITET ZA PODZEMNU EKSPLOATACIJU MINERALNIH SIROVINA*, vol. 14, n° 2, pp. 37-48, 2012.
- [12] C. Shengai, L. Pin, C. Enqi, S. Jiao y H. Bo, «Experimental study on mechanical property and pore structure of concrete for shotcrete use in a hot-dry environment of high geothermal tunnels,» *Construction and Building Materials*, vol. 173, pp. 124-135, 2018.
- [13] S. B. Erik, «Age-dependent changes in post-crack performance of fibre reinforced shotcrete linings,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 49, pp. 241-248, 2015.
- [14] R. Palmier Manfredi y F. de Andrade Silva, «Test Methods for the Characterization of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete: A Comparative Analysis,» *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 24, pp. 856-866, 2020.
- [15] W. J. Ping, H. F. Jiang, Y. P. Jian, S. Qiang y X. Xing, «Experimental Study and Engineering Application of Polypropylene Fiber Shotcrete for Bored Tunnels in Water-Rich Strata,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, pp. 8655-8666, 2020.
- [16] Y.-Z. BI, D.-I. Zhang y J.-h. HU, «Application of modified polypropylene (crude) fibers concrete to,» *JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING*, vol. 18, n° 4, pp. 379-384, 2012.
- [17] R. Muhammad Usman, «Experimental investigation on durability characteristics of steel and polypropylene fiber reinforced concrete exposed to natural weathering action,» *Construction and Building Materials*, vol. 250, p. 118910, 2020.
- [18] L. Guoming, C. Weimin y C. Lianjun, «Investigating and optimizing the mix proportion of pumping wet-mix shotcrete with polypropylene fiber,» *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 14-23, 2017.
- [19] M. M., S. M y A. L. N., «Application of Steel Fiber Reinforced Lightweight Aggregate,» *Journal of Mining Science*, vol. 47, n° 5, pp. 606-617, 2011.
- [20] M. Vandewalle, «The use of steel fibre reinforced,» *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 98, n° 3, pp. 113-120, 1996.
- [21] S. H. V. E. W. C. R y T. A. G., «Laboratory testing of steel fibre reinforced shotcrete,» *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 57, pp. 167-171, 2013.
- [22] W. Jiabin y N. Ditao, «Influence of freeze-thaw cycles and sulfate corrosion resistance on shotcrete with and without steel fiber,» *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 628-363, 2016.
- [23] E. Stefan Bernard, «Age-dependent changes in post-crack performance of fibre reinforced shotcrete linings,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 49, pp. 241-248, 2015.