

Ductilidad estructural y fragilización del shotcrete reforzado con fibras. Problemas y soluciones

Structural ductility and embrittlement of fiber-reinforced shotcrete: Problems and solutions

Jim Kerri Quinto Espinoza¹

Recibido: 01/01/2023 - Aprobado: 14/04/2023 – Publicado: 02/06/2023

RESUMEN

En la mina Huanzalá fueron identificados los problemas en el shotcrete reforzado con fibras (en adelante SRF). Las labores mineras subterráneas presentan deterioro en el shotcrete agrietado, razón por la cual se analiza la ductilidad estructural y fragilización del SRF de acero y polímero.

Las deformaciones iniciales alrededor de la excavación son estimadas con el software RS2, que indican que el SRF presentará grietas que son monitoreadas en campo (ancho y convergencia); las propiedades de absorción de energía del SRF de acero y polímero son obtenidas por ensayos de laboratorio. Para casos de fibra de acero, la ductilidad estructural después de una grieta cae de manera constante debido al cambio de una falla dúctil a falla de rotura frágil, por esa razón, las fibras de acero fueron reemplazadas por fibras de polímero en el diseño SRF. Las características de absorción de energía del SRF de polímero no indican ninguna caída de la capacidad con el aumento del ancho de la grieta y los efectos de la fragilización son nulas.

Posteriormente, los resultados logrados respecto al comportamiento posagrietamiento de un SRF de polímero son sustento para que en la mina Pallancata se permitan y normalicen las fisuras y grietas.

Palabras claves: Excavaciones permanentes, excavaciones temporales, ductilidad estructural del shotcrete, fibras de acero, fibras de polímero, fragilización del shotcrete, shotcrete reforzado con fibras, sostenimiento subterráneo.

ABSTRACT

In the Huanzalá Mine, the problems in the fiber-reinforced shotcrete (hereinafter SRF) were identified, the underground mining works present deterioration in the cracked shotcrete, therefore, the structural ductility and embrittlement of the steel and polymer SRF are analyzed.

The initial deformations around the excavation are estimated with the RS2 software, which indicate that the SRF will present cracks that are monitored in the field (width and convergence); the energy absorption properties of steel and polymer SRF are obtained by laboratory tests. For steel fiber cases, the structural ductility after a crack drops steadily due to the change from ductile failure to brittle failure, for that reason, steel fibers were replaced by polymer fibers in SRF design, the energy absorption characteristics of the polymer SRF do not indicate any drop in capacity with increasing crack width and the effects of embrittlement are nil.

Subsequently, the results achieved regarding the post-cracking behavior of a polymer SRF are support so that fissures and cracks are allowed and normalized in the Pallancata Mine.

Keywords: Permanent excavations, temporary excavations, structural ductility of shotcrete, steel fibers, polymer fibers, embrittlement of shotcrete, fiber reinforced shotcrete, underground support.

¹ Universidad Nacional de Huancavelica, Facultad de Ingeniería de Minas. Huancavelica, Perú.
Universidad de Talca, Facultad de Ingeniería. Curicó, Chile. Geomecánico en Hochschule, Mina Pallancata.
E-mail: jim.quinto@hocplc.com - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7426-7558>

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años en el Perú el SRF es utilizado por la ingeniería minera, debido a la calidad del sostenimiento que brinda y por ser la mejor revolución en cuanto a mejoras de sostenimiento. En cuanto a su vida útil, existen dos tipos de excavaciones: temporales y permanentes, en cada uno de estos casos se requiere conocer el comportamiento del shotcrete reforzado con fibras.

El uso del shotcrete reforzado con fibras, debido a su naturaleza y condición de carga en el macizo rocoso, presenta una serie de “defectos”, entre lo más resaltante está la generación de fisuras y grietas.

La ductilidad estructural en el corto o largo plazo depende de las fibras de refuerzo en el shotcrete, si se requiere una alta tenacidad a lo largo de la vida de la mina, entonces es necesario mirar más allá del rendimiento que comúnmente es ensayado a los 28 días.

La fragilización es un proceso insidioso que raras veces es analizado en la minería peruana, esto influye en la disminución constante de la ductilidad estructural del SRF, por lo tanto, la capacidad de absorción de energía es menor a la ensayada a los 28 días.

Para conocer el comportamiento de las fisuras o grietas se realizan ensayos de control de calidad del SRF, generalmente a edades “tempranas” (28 días) y se asume que mantendrá este resultado óptimo a través del tiempo; para el caso de labores temporales estos resultados son correctos, sin embargo, es necesario conocer y analizar el rendimiento del shotcrete para labores mineras permanentes con la vida útil final del proyecto; en este caso, el rendimiento y la seguridad dependen de la conservación fiable de la integridad estructural. A menudo se asume que la ductilidad estructural del SRF está totalmente definida por el resultado obtenido en una prueba de rendimiento por flexotracción realizado a 28 días de acuerdo con normas (ASTM C1609 / C1609M o EN141651), sin embargo, el SRF podría presentar fisuramiento y agrietamiento en el corto plazo y las operaciones mineras deberían convivir con condiciones agrietadas del SRF (estableciendo límites en ancho y longitud).

La ductilidad del SRF es importante por muchas razones, que incluyen, advertir un colapso incipiente por el desarrollo de grandes deformaciones antes de este colapso, dotar al SRF la capacidad de redistribuir las acciones internas a medida que se aproxima la carga de colapso; permitir que se adapte una deformación relativamente grande y que se absorba energía sin colapso durante una liberación de energía brusca. No aprovechar correctamente la ductilidad del SRF se traduce en problemas para la seguridad y rentabilidad para una empresa minera subterránea.

1.1 Ubicación y acceso de las minas en estudio

Mina Huanzalá

Políticamente se encuentra ubicada en el distrito de Huallanca, provincia de Bolognesi, región de Ancash; el centro de operaciones se sitúa a 8 Km en línea recta y 12

km por vía asfaltada, al noroeste del pueblo más cercano denominado Huallanca y a 440 km de distancia de la ciudad de Lima.

Geográficamente la mina se halla entre la prolongación de la cordillera Blanca y cordillera Huayhuash, al sur del cerro Huanzalá y al noreste de un valle glaciar por donde fluye el río Torres, a una altitud entre 3800 y 4000 msnm.

Mina Pallancata – Hochschild

Políticamente se encuentra ubicada en el distrito de Coronel Castañeda, provincia de Parinacochas, región de Ayacucho.

Geográficamente la mina se encuentra ubicada a una altura de 4450 msnm, en la cabecera de la cuenca del río Suyamarca, flanco oriental de la cordillera Occidental de los andes del sur del Perú.

1.2 Objetivos de la investigación

El objetivo principal de la presente investigación es analizar la ductilidad estructural y fragilización del shotcrete reforzado con fibras de acero y fibras de polímero. Se busca aprovechar la ductilidad estructural posagrietamiento y verificar los casos en que no son favorables a dicha ductilidad (fragilización).

1.3. Problemática

Toda excavación minera subterránea sufrirá deformaciones, algunos en mayor o menor medida; si parte del sistema de fortificación es el SRF, este tendrá una deformación elástica muy limitada (zona de preagrietamiento), posterior a esta deformación el SRF presenta fisuras y grietas y los costos por mantenimiento de sostenimiento o rehabilitación por año ascendieron a 43500 USD (caso de la mina Huanzalá), estos costos llegan a representar entre el 30% y el 50% del costo de sostenimiento de la mina.

De acuerdo a la simulación numérica de deformación (software RS2), se tendrán deformaciones de 9 mm y 42 mm, con estas deformaciones se evidenciarán fisuras y grietas en el SRF (el concreto es sumamente rígido); en la excavación de estudio de la Mina Huanzalá, el tramo con evidencias de grietas es de 25 m lineales y debería paralizar el minado si no se toleran las fisuras y grietas para proceder con el mantenimiento del SRF que tendría un costo de 3500 USD, sin considerar las pérdidas por la no continuidad de la producción de mineral.

Por lo descrito, el presente estudio analiza la ductilidad estructural del SRF para labores temporales y la ductilidad estructural condicionada por la fragilización para las labores permanentes; asimismo, las opciones adoptadas como solución.

Se tiene como base investigaciones realizadas sobre la ductilidad posagrietamiento y los resultados de laboratorios en el Perú sobre la carga y energía absorbida del SRF, en ellas se corroboran que la resistencia residual a una deflexión de 25 mm es de 30 KN, lo que indica que se tiene aún la capacidad del 60 % para edades tempranas.

Adicionalmente, los desplazamientos reales fueron monitoreados en campo, el ancho y longitud de las grietas fueron medidas periódicamente.

II. MÉTODOS

2.1 Deformación alrededor de la excavación

Toda excavación subterránea sufrirá deformaciones de acuerdo con las condiciones propias de cada mina (ver

figura 1). Mediante el software RS2 (ver figura 4) se analizan las deformaciones aproximadas que se presentan en la zona específica del inicio de estudio (mina Huanzalá) (ver figura 2). Asimismo, se estiman las deformaciones esperadas en la mina Pallancata (ver figura 3). En el SRF se tendrá una deformación elástica muy limitada, posterior a esta deformación, el SRF presentará fisuras o grietas, tal como se evidencian en la presente investigación.

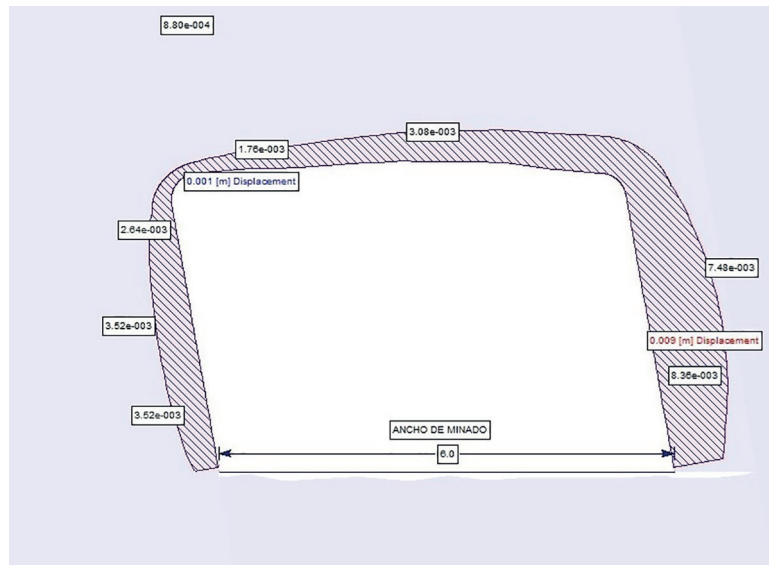


Figura 1. Deformación alrededor de la excavación

Nota: Deformación estimada mediante el software RS2, el desplazamiento más representativo está en la caja techo (pared colgante)

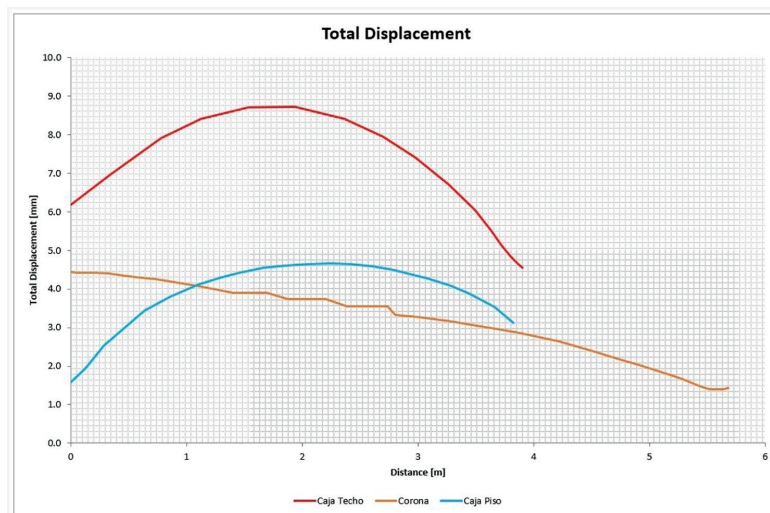


Figura 2. Curvas de desplazamiento en las caras principales del Tajo A1150 – mina Huanzalá

Nota: Curvas de desplazamiento, caja techo (pared colgante) con pico máximo de 9 mm

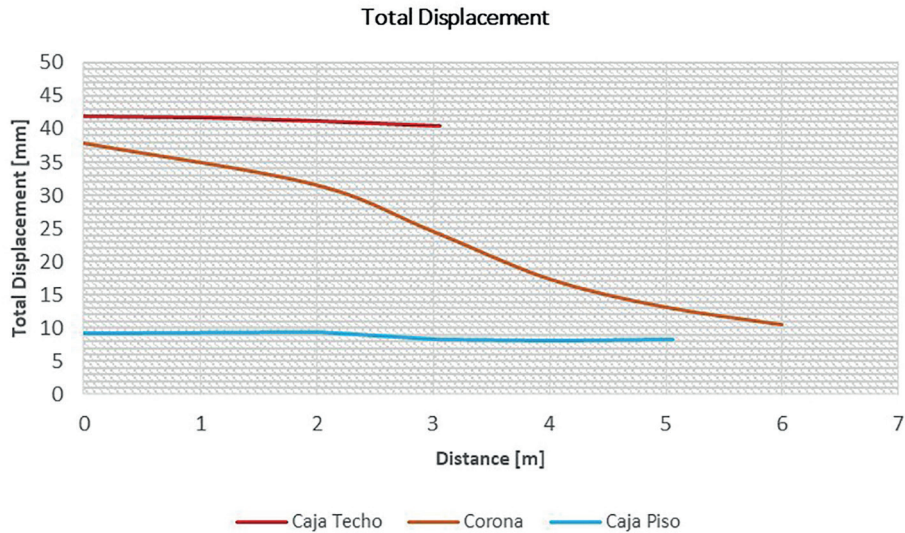


Figura 3. Curvas de desplazamiento en las caras principales del Tajo BA 1905-2 – mina Pallancata
 Nota: Curvas de desplazamiento, caja techo (pared colgante) con pico máximo de 42 mm

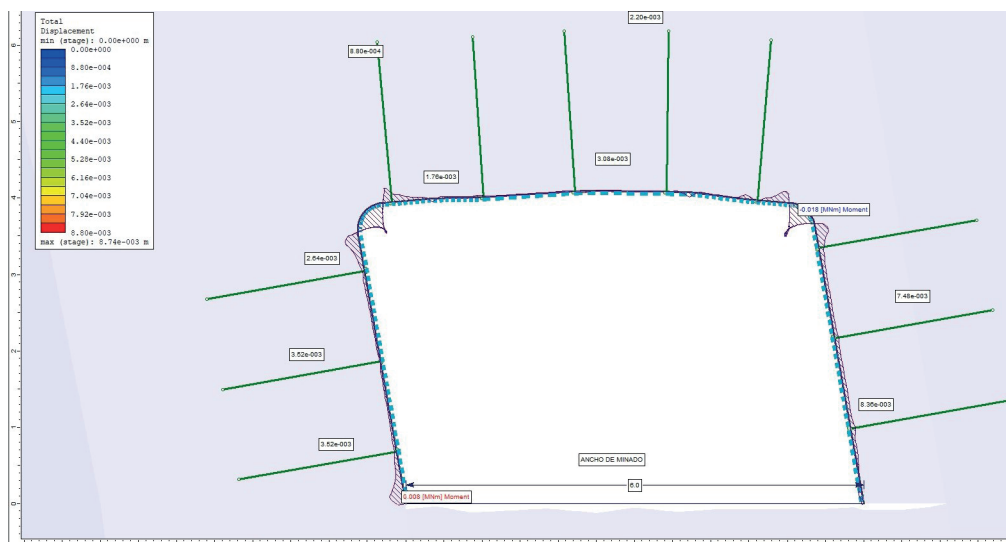


Figura 4. Momento flector esperado en el SRF
 Nota: Mediante el software RS2, se estima el momento flector máximo de 0.018 MNm en la caja techo (pared colgante), momento flector que experimentará el SRF. Estos momentos flectores se usaron para predecir la respuesta de rotación de la fisura para diferentes esfuerzos de compresión axial (Gilbert & Bernard 2018)

2.2 Ductilidad estructural en el shotcrete reforzado con fibras (SRF)

Al inicio de esta investigación, el estándar sobre el diseño de shotcrete de la mina Huanzalá solo contempla el uso de fibras de acero como refuerzo. Posteriormente, el uso de fibras de polímero surgió como solución a problemas que se describirán en adelante.

A continuación, se muestran las características de la carga aplicada, desde la fisuración hasta la carga máxima, así como la energía absorbida para diferentes dosificaciones de fibra de acero y polímeros.

2.2.1 Diseño con fibras de acero

El uso de fibras de acero tiene referencia en la norma ASTM A820-01 “Standard specification for steel fibers for fiber-reinforced concrete”. El diseño está en base a la calidad del macizo rocoso y al valor de absorción de energía que se requiere, el diseño con 20 kg/m³ de fibra de acero se encuentra implementada en la mina Huanzalá (ver Tabla 1).

2.2.2 Diseño con fibras de polímero

El uso de fibras de polímero tiene referencia en la norma UNE-EN 14889 – 2, “Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras

Tabla 1. Carga (KN) y energía absorbida para SRF de acero

Dosificación Kg/m ³	Carga (KN)		Energía absorbida (J)
	Fisuración	Máxima	
15	35.93	35.93	415.91
20	36.48	39.65	533.78
30	36.08	48.05	647.98

Nota: Con propósito de comparación se presentan los resultados de 15, 20, y 30 kg/m³ de fibra de acero. Se obtuvo una carga de fisuración de 36.48 KN para 20 kg/m³

poliméricas” (AENOR 2008). El diseño está en base a la calidad del macizo rocoso y el valor de absorción de energía que se requiere, el diseño con 4 kg/m³ de fibra de polímeros se analiza para su implementación la mina Huanzalá y en la mina Pallancata se encuentra implementada el diseño con 5 kg/m³ (ver tabla 2).

2.3 Comportamiento de la curva de carga y deflexión

2.3.1 Shotcrete reforzado con fibras de acero

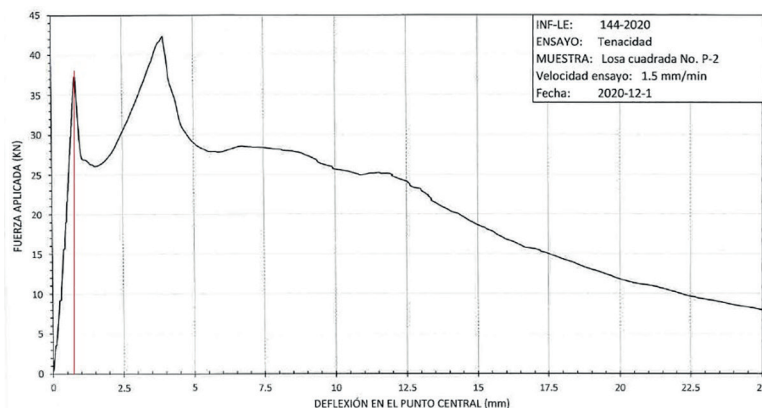
El comportamiento evidencia que después del primer fisuramiento, existe el comportamiento dúctil hasta una

deflexión de 25 mm para un ensayo a 28 días (ver figura 5). Sin embargo, de acuerdo con los resultados de la Figura 6 (Bernard 2004), se volvieron a realizar ensayos (re-test) a muestras fisuradas que fueron expuestas a condiciones ambientales externas, los resultados indican que la absorción de energía residual cayó bruscamente con el aumento del ancho de fisura y no continúa manteniendo las características de ductilidad, en solo 24 meses de exposición se tiene una pérdida de absorción de energía de más del 50% (Bernard 2004).

Tabla 2. Carga (KN) y energía absorbida para SRF de polímero

Dosificación Kg/m ³	Carga (KN)		Energía absorbida (J)
	Fisuración	Máxima	
4	52.41	54.17	729.10
5	46.39	51.15	812.03
6	39.77	50.98	1059.62

Nota: Con propósito de comparación se presentan los resultados de 4, 5 y 6 kg / m³ de fibra de polímeros. Se obtuvo una carga de fisuración de 52.41 KN para 4 kg/m³

**Figura 5.** Curva de carga y deflexión de un SRF de acero

Nota: Curva de carga y deflexión de un SRF de acero, el desempeño a 28 días de ensayo según la norma EFNARC 1996 (Acápites 10.4). Lado derecho de la línea roja indica el comportamiento dúctil, finalizando en 8 KN para 25 mm de deflexión (PUCP 2020)

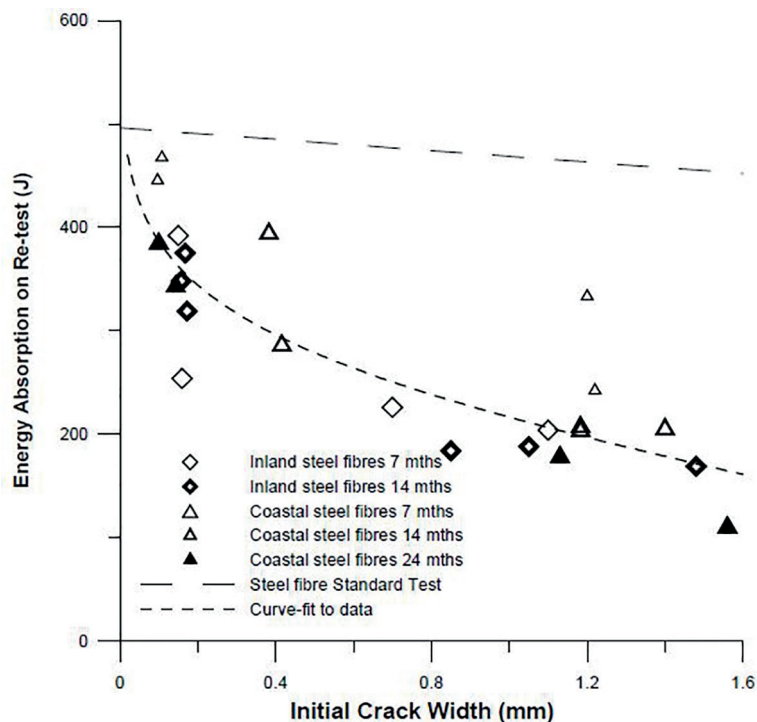


Figura 6. Ensayo después de la exposición para muestras de SRF de acero
 Nota: Absorción de energía al volver a realizar la prueba después de la exposición para muestras de SRF de acero, se evidencia caída de la ductilidad. Ensayos según ASTM C-1550 (Bernard 2004)

2.3.2 Shotcrete reforzado con fibras de polímero

Al igual que el SRF de acero, el comportamiento evidencia que después del primer fisuramiento, existe un comportamiento dúctil hasta una deflexión máxima de 25 mm para un ensayo a 28 días (ver figura 7). De acuerdo con los resultados de la Figura 8 (Bernard 2004), se volvieron a realizar ensayos a muestras fisuradas que fueron expuestas a condiciones ambientales externas, los resultados indican

que el desempeño residual continúa manteniendo las características de ductilidad.

De acuerdo con los ensayos descritos en los puntos 2.3.1 y 2.3.2, para ambos tipos de fibra, el shotcrete experimenta el primer fisuramiento entre 0.5 mm y 1.5 mm de deflexión, a partir de ello, son las fibras las que provocan un comportamiento dúctil hasta una deflexión total ensayada de 25 mm. Este comportamiento debe

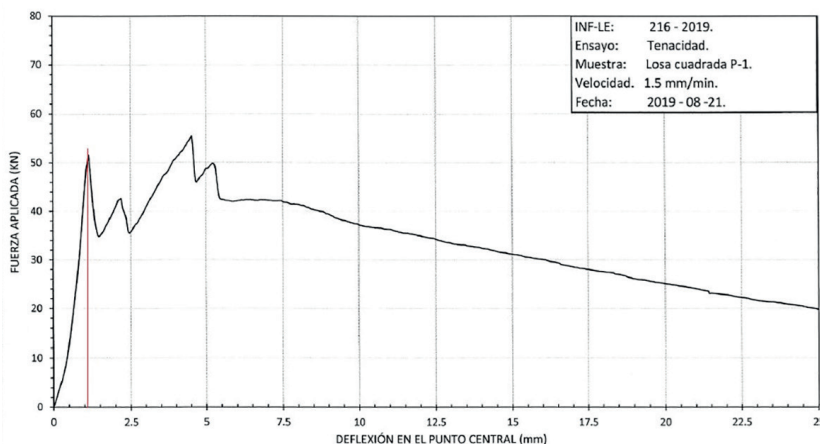


Figura 7. Curva de carga y deflexión de un SRF de polímero
 Nota: Curva de carga y deflexión de un SRF de polímero, el desempeño a 28 días de ensayo según la norma EFNARC 1996 (acápito 10.4). Lado derecho de la línea roja indica el comportamiento dúctil, finalizando en 20 KN para 25 mm de deflexión (PUCP 2019)

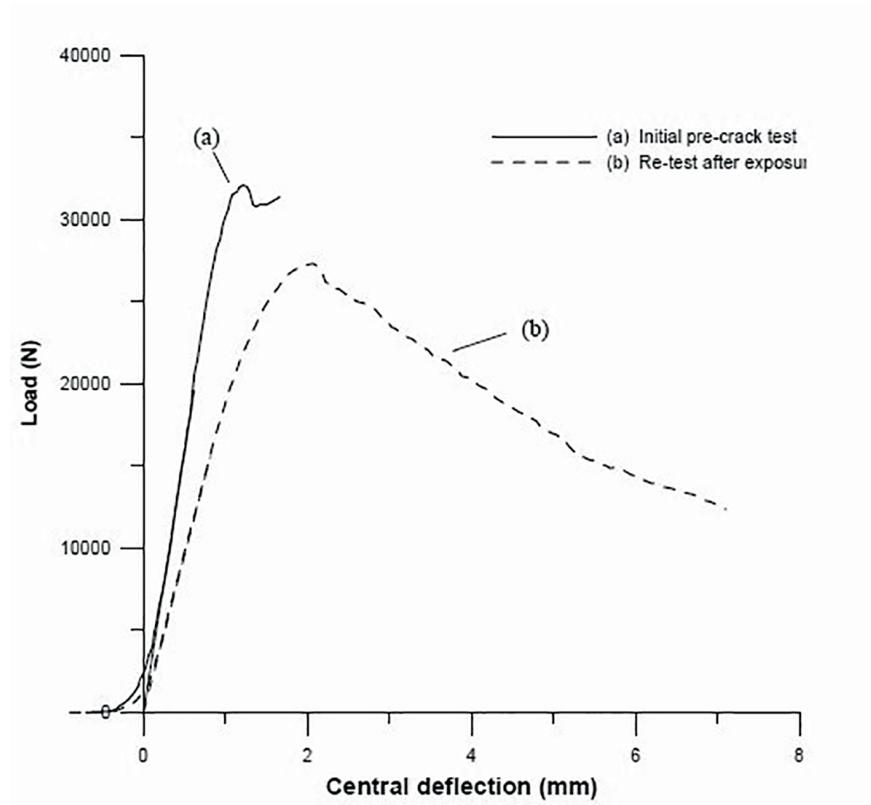


Figura 8. Curvas de carga y deflexión de un SRF de polímero, antes del agrietamiento
 Nota: Curvas de carga y deflexión de un SRF de polímero, antes del agrietamiento (a) y el desempeño residual después de la exposición (b) (Bernard 2004)

ser revisado en el siguiente punto, en donde se detalla el módulo de elasticidad.

2.4 Módulo de elasticidad del SRF

Se realizaron los ensayos para verificar la rigidez del SRF, la norma del ensayo para la determinación del módulo de elasticidad es la ASTM C469 “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”.

En la tabla 3, la relación de la carga máxima, resistencia a compresión de la probeta y el módulo de elasticidad.

En la Figura 9, se observan propiedades de la relación de la fuerza aplicada y deformación. Se puede ver que el módulo de elasticidad está representado estrictamente en la parte recta; asimismo, la deformación unitaria se incrementa mientras actúa la carga durante el ensayo, en consecuencia se determina que el concreto (en este caso un SRF) es un material altamente rígido con baja deformabilidad, con estas propiedades del SRF y las deformaciones estimadas para nuestras excavaciones mineras, existirán desde microfisuras hasta grietas visibles para todo el personal que ingresa a mina, por tanto, las fisuras en el SRF serán comunes cuando existan cargas actuando.

Tabla 3. Módulo de elasticidad para un shotcrete reforzado con fibras

Probeta N°	Carga máxima (KN)	R' _c (Mpa)	E (Mpa)
1	572.4	31.34	21239
2	555.7	30.42	20955
3	576.5	31.77	22313
	Prom.:	31.2	21502
	D.E.:	0.7	7.16
	C.V. (%):	2.21	3.33

Nota: Carga máxima, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad para un shotcrete reforzado con fibras

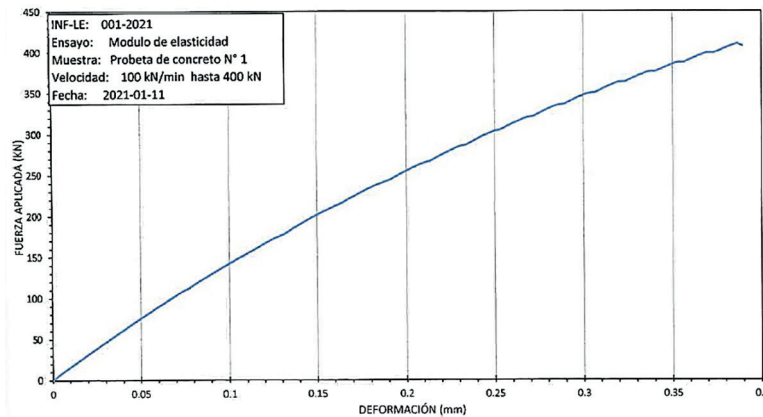


Figura 9. Curva de fuerza y deformación del ensayo de módulo de elasticidad
 Nota: La curva representa la rigidez del concreto, que para esta investigación es un SRF, en promedio se obtiene un módulo de elasticidad de 21.5 Gpa (PUCP 2021)

2.5 Fragilización en el rendimiento posagrietamiento

La fragilización del SRF representa la pérdida del rendimiento dúctil debido a un cambio significativo en su modo de falla a medida que el SRF logra naturalmente resistencia con la edad.

Una investigación sobre el rendimiento a largo plazo del SRF de acero ha revelado que a medida que el SRF envejece y su fuerza aumenta (ver tabla 4), la fragilización puede ocurrir (Bernard 2008).

Las figuras 10 y 11 muestran el resultado de la investigación de Bernard (2008) sobre la fragilización por ganancia de resistencia del SRF de acero y polímeros.

Por otro lado, sabiendo que en el SRF las fisuras y grietas son normales teniendo en cuenta las deformaciones estimadas de las excavaciones mineras subterráneas. Para el caso de las fibras de acero, adicional a lo mostrado en la Figura 10, en una fisura, las fibras sufrirán corrosión y estos degradarán el rendimiento del SRF porque el mecanismo de falla se dará como en la Figura 12.

Para un rendimiento menor a 28 días, los resultados de ensayos según normas técnicas son correctos, para SRF de acero que estén expuestos mayores a 28 días se presentan problemas de fragilización por ganancia de resistencia y corrosión del acero en las fisuras.

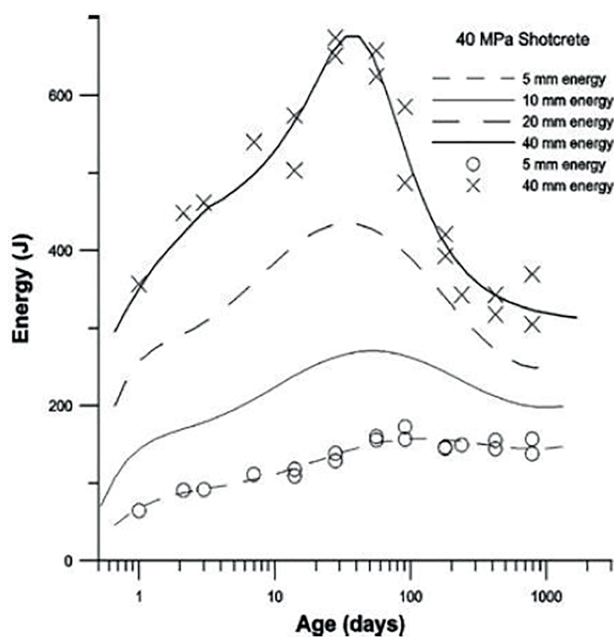


Figura 10. Absorción de energía a 5, 10, 20 y 40 mm para fibra de acero en SRF de 40 Mpa
 Nota: Caída de la absorción de energía en función de la edad para muestra de SRF con resistencia a la compresión de 40 Mpa (Bernard 2008)

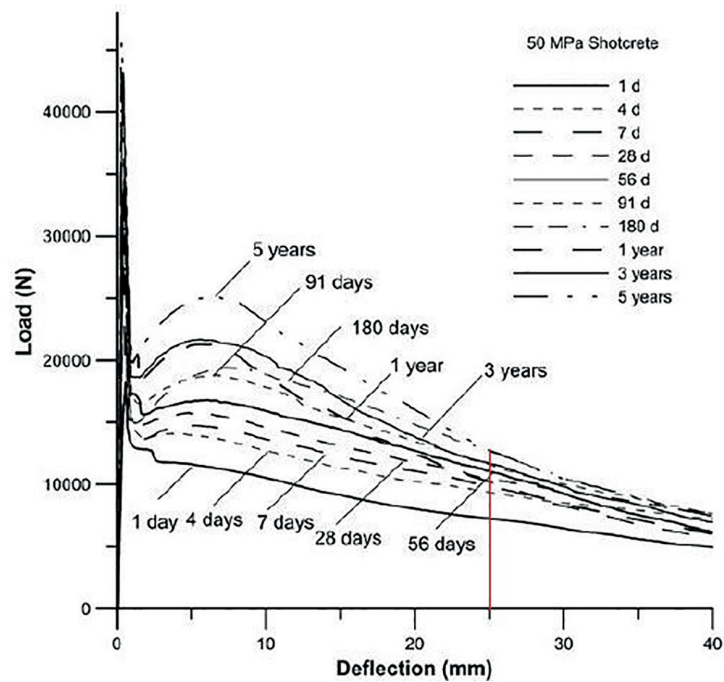


Figura 11. Curvas de carga y deflexión para SRF de polímero a diferentes edades
 Nota: Se evidencia que se mantiene el rendimiento en todas las deflexiones con la edad, ensayos a 1, 3 y 5 años. La línea roja delimita la deflexión a 25 mm, que en 5 años mantiene una carga mayor a 10 kN (Bernard 2008)

Tabla 4. Resistencia a la compresión, mina Huanzalá 2021

Edad	Resistencia (F 'c)	F 'c Corregido por esbeltez	F 'c Promedio (km/cm ²)
3 días 31- Ene	144.24	142.51	172
	218.11	215.14	
	161.30	159.49	
7 días 04- Feb	289.34	285.87	278
	232.30	229.51	
	312.87	318.01	
14 días 11- Feb	256.03	252.96	282
	310.39	306.67	
	289.17	285.93	
90 días 28- Abr	428.17	421.66	436
	435.33	424.88	
	467.65	462.04	

Nota: Resistencia a la compresión de testigos cilíndricos de acuerdo con ASTM C39, mina Huanzalá 2021. Se evidencian resistencias ganadas de hasta 436 kg/cm² a 90 días de ensayo

La corrosión del acero puede conducir a una pérdida de rendimiento, principalmente por una pérdida de sección del acero que conduce a una falla frágil inducida por la corrosión (Kosa & Naaman, 1990) (ver Figura 13 y 14).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Verificación y seguimiento de la deformación y el proceso de agrietamiento

3.1.1 Identificación y pintado de las fisuras y grietas

Durante el proceso de seguimiento diario por parte del personal de Geomecánica de la mina Huanzalá, se

identificaron y pintaron las fisuras generadas en el SRF de acero. (ver Figura 15).

3.1.2 Medición del ancho de las grietas

Se realiza la medición de forma manual usando escalímetros o regla protractor, el personal encargado lo hace de forma paralela a la medición de convergencias (ver Figuras 16 y 17).

3.1.3 Medición de la deformación real de la excavación

Para un control de la deformación máxima (convergencia), se implementaron puntos de control para mediciones con cinta extensométrica marca Geokon; las mediciones fueron

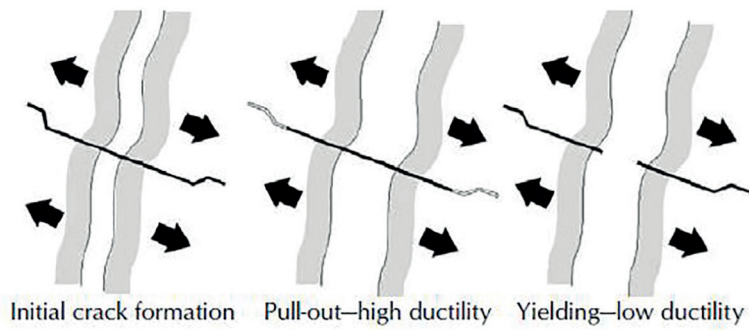


Figura 12. Mecanismos de falla posagrietamiento para SRF de acero

Nota: Mecanismos de falla posagrietamiento, esto se debió al desarrollo de alta resistencia y dureza en la matriz del concreto que dio como resultado un cambio del modo de extracción de alta energía del comportamiento de la fibra después de la fisura al modo de falla de la fibra de bajo rendimiento energético. Este comportamiento también se ha observado en la prueba de extracción de una sola fibra. La corrosión en la fisura contribuye a este mecanismo (Bernard 2008)



Figura 13. SRF de acero con grietas expuestas

Nota: SRF de acero con grietas expuestas de 2.0 mm – 4.5 mm, 10 días de exposición y corrosión superficial del acero. Se estima futura fragilización inducida básicamente por la corrosión de fibras en las grietas



Figura 14. Labor minera subterránea con SRF de acero (excavación permanente)

Nota: Esta excavación permanente solo tiene 6 meses de haber realizado la fortificación con SRF, sin embargo, el SRF de acero debe ser reemplazado para evitar el riesgo de desprendimiento por pérdida de ductilidad debido a la fragilización inducida por la corrosión. El macizo rocoso presenta mineralización de pirita

realizadas de acuerdo con la deformación progresiva evidenciada (ver Figuras 18 y 19).

3.2 Sostenimiento subterráneo con condiciones agrietadas del SRF de polímero – mina Pallancata

Lo descrito en los puntos anteriores, es sustento para que las fisuras y grietas en el SRF de polímeros sean normalizados en la unidad minera Pallancata (ver figuras 20 y 21), actualmente, todo el personal que ingresa a mina y observa fisuras o grietas en el shotcrete, sabe que es porque el SRF está actuando correctamente. El uso de fibras de polímero en lugar de las fibras de acero está en base a lo descrito en

el punto 2.3.2 y la Figura 8, en donde está demostrado que las fibras de polímero en un shotcrete agrietado mantiene sus características de ductilidad.

El personal del área de Geomecánica monitorea continuamente el ancho y longitud de grietas, asimismo, se verifican las deformaciones reales de la excavación. El proceso de investigación continúa hasta definir cuál es el ancho máximo permisible de una grieta en SRF de polímero (ver figura 22), asimismo, conocer el efecto de la compresión axial sobre la ductilidad posterior a la fisuración.



Figura 15. Identificación y pintado de las fisuras generadas en el SRF de acero
 Nota: Inspección para el pintado de las fisuras y grietas generadas en el SRF de acero en el tajo A 1150 (excavación temporal). Esto facilita la visión de todo el personal que ingresa a este tajo

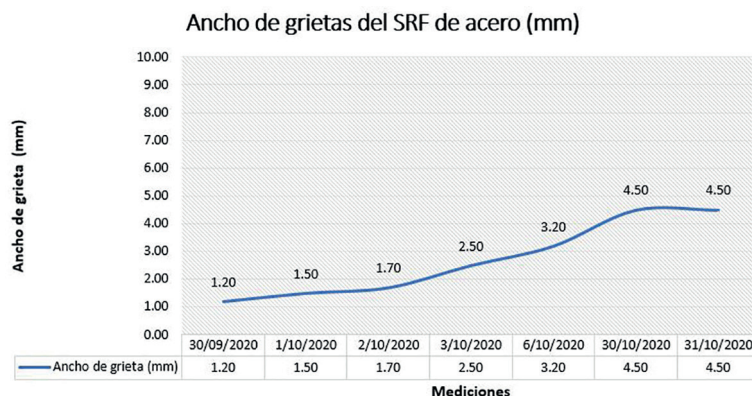


Figura 16. Incremento progresivo del ancho de grieta
 Nota: Mediante mediciones periódicas se registra el incremento progresivo del ancho de grieta, las aberturas máximas fueron de 4.5 mm en 1 mes



Figura 17. Medición del ancho de grietas en el SRF de acero
 Nota: Fotografía al personal realizando la medición del ancho de grieta en el SRF

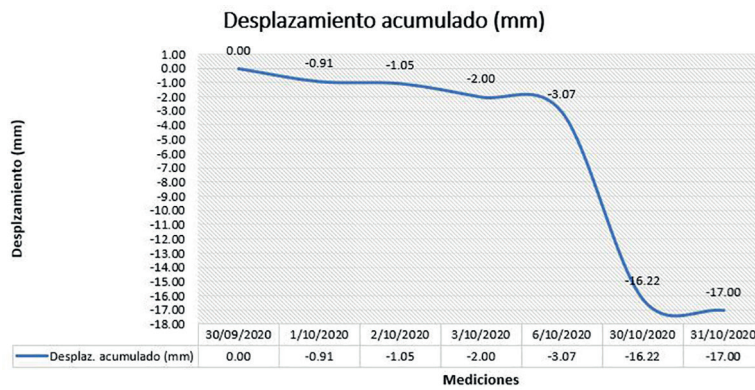


Figura 18. Convergencias que evidencian deformación horizontal
 Nota: Mediante medición de convergencias se evidenciaron las deformaciones progresivas, los registros indicaron máximas de hasta 17 mm en 1 mes

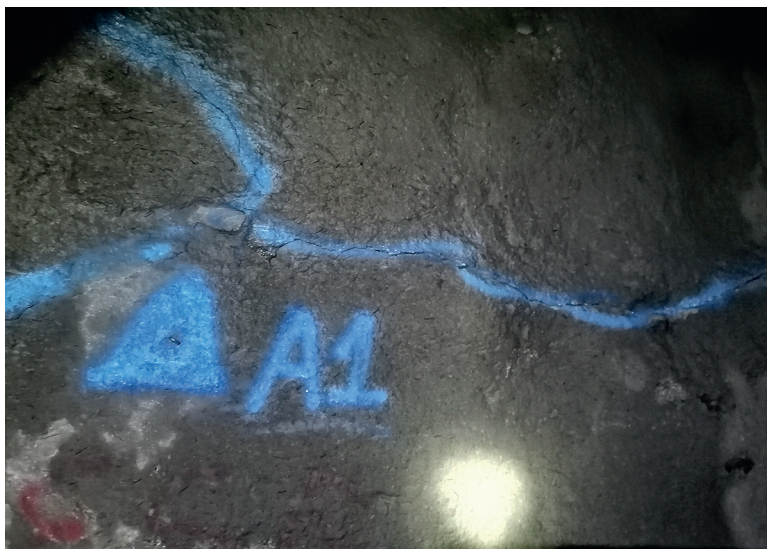


Figura 19. Punto para medición de convergencias durante el proceso de minado
 Nota: Fotografía del punto de convergencia implementada en la caja techo (pared colgante)



Figura 20. Excavación subterránea permanente con shotcrete agrietado en la mina Pallancata
Nota: SRF de polímero con agrietamiento transversal, en este caso se mantiene la ductilidad posagrietamiento para una excavación permanente

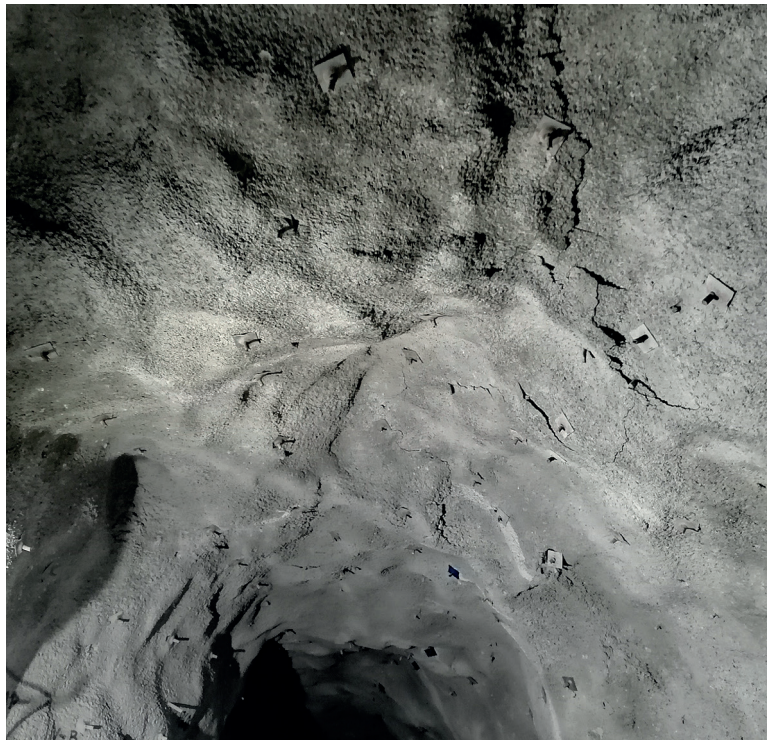


Figura 21. Excavación subterránea temporal con shotcrete agrietado en la mina Pallancata
Nota: SRF de polímero con fisuramiento y agrietamiento en varios puntos de la corona, en este caso se mantiene la ductilidad posagrietamiento para una excavación temporal, cabe recordar que, para fibras de polímero y fibras de acero, no habrá problemas de pérdida de ductilidad o fragilización para un sostenimiento temporal



Figura 22. Agrietamiento de SRF de polímeros

Nota: Agrietamiento de hasta 8 mm en el SRF, se evidencian las fibras de polímero. Las fibras actúan como puentes de transferencia de carga, aumentando la capacidad de deformación

IV. CONCLUSIONES

La fragilización es un proceso insidioso y peligroso por el cual la ductilidad estructural del SRF disminuye constantemente con el tiempo, por lo tanto, la capacidad de absorción de energía es menor a la ensayada a los 28 días.

La tenacidad proporcionada por las fibras conduce a una alta capacidad de carga y deformación, incluso para shotcrete considerablemente agrietado, esto indica que el diseño del SRF es económico y brinda seguridad aún con fisuras o grietas.

Para labores mineras temporales, los resultados obtenidos a 28 días satisfacen el rendimiento para fibras de acero y polímero; siendo así se aprovecha la ductilidad estructural del SRF con fibras de acero, aún con grietas.

Para labores mineras permanentes, cuando se usan fibras de acero, la ductilidad estructural después de una grieta cae de manera constante debido al cambio de una falla dúctil a falla de rotura frágil y esto no es bueno para la seguridad.

Las características de absorción de energía de SRF de polímero no indican ninguna caída de la capacidad con el aumento del ancho de la grieta (hasta 5 mm) y los efectos de la fragilización son nulas; si no se toleran las grietas en el SRF, no se deberían usar fibras. El personal anteriormente creía que, si un SRF está agrietado, es inseguro y debería cambiarlo; ahora el personal que ve alguna grieta en el SRF sabe que el shotcrete está trabajando correctamente (Caso de la mina Pallancata).

Si se requiere una alta tenacidad a lo largo de la vida de la mina, entonces es necesario mirar más allá del rendimiento que comúnmente es ensayado a los 28 días (siguiendo las indicaciones de normas ASTM o EFNARC) y considerar los efectos del desarrollo de fuerza excesiva y la fragilidad en el rendimiento a largo plazo.

Un rendimiento satisfactorio con respecto a las pruebas de resistencia al control de calidad a los 28 días puede no garantizar un rendimiento satisfactorio a edades posteriores (largo plazo), al menos para algunos tipos de fibra de acero. Por lo tanto, es necesario considerar el rendimiento del SRF agrietado y su efecto a largo plazo y evaluar la fibra más adecuada para utilizar como refuerzo en las labores permanentes de larga duración.

V. AGRADECIMIENTOS

A la unidad minera Huanzalá y en particular al Ing. Carlos Alvarado, a la unidad minera Pallancata y al Ing. José Jiménez e Ing. Benjamín Torreblanca, por su aporte para el desarrollo de esta investigación

VI. REFERENCIAS

AENOR. (2008). *Norma UNE-EN 14889-2:2008 Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad.* Asociación Española de Normalización y Certificación: España. Retrieved from <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-14889-2-2008-n0040618>

ASTMA820-01 Internacional. (2001). *Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete*. United States. Retrieved from <https://www.astm.org/standards/a820>

ASTM C1550 Internacional. (2020). *Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)*. United States. Retrieved from <https://www.astm.org/c1550-20.html>

ASTM C39/C39M Internacional. (2001). *Standard Test Method For Compressive Strength Of Cylindrical Concrete Specimens*. United States. Retrieved from https://www.astm.org/c0039_c0039m-21.html

ASTM C469 Internacional. (2002). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. United States. Retrieved from https://www.astm.org/c0469_c0469m-14.html

Bernard, E. (2004). *Durability of cracked fibre reinforced shotcrete*. In *In Shotcrete: more engineering developments* (1st Edition ed., pp. 59-66). CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/9780203023389-6>

Bernard, E. (2008). *Embrittlement of Fiber-Reinforced Shotcrete*. *Shotcrete*, 10(3), 16-21. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/284099980>

EFNARC. (1996). *European Specification for Sprayed Concrete*. European Federation of National Associations of Specialist Contractors and Material Suppliers for the Construction Industry. Retrieved from <https://efnarc.org/publications-form>

Gilbert, R., & Bernard, E. (2018). *Post-cracking ductility of fibre reinforced concrete linings in combined bending and compression*. *ScienseDirect*, 9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.02.010>

Kosa, K., & Naaman, A. (1990). *Corrosion of Steel Fiber Reinforced Concrete*. *Materials Journal*, 87(1), 27-37. doi:<https://doi.org/10.14359/2337>

PUCP. (2019). *Determinación de la tenacidad del concreto con fibras, usando losa cuadrada en flexión, con carga centrada y apoyo perimetral*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Unidad Huanzala: INF-LE 216.19.

PUCP. (2019). *Determinación de la tenacidad del concreto con fibras, usando losa cuadrada en flexión, con carga centrada y apoyo perimetral*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Unidad Huanzala: INF-LE 360.19.

PUCP. (2020). *Determinación de la tenacidad del concreto con fibras, usando losa cuadrada en flexión, con carga centrada y apoyo perimetral*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Unidad Huanzala: INF-LE 144.20.

PUCP. (2021). *Determinación de la tenacidad del concreto con fibras, usando losa cuadrada en flexión, con carga centrada y apoyo perimetral*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Mina Santa Luisa: INF-LE 051.21.

PUCP. (2021). *Determinación del módulo de elasticidad de probetas estándar de concreto (6"x12")*. Pontificia Universidad Católica del Perú. INF-LE 001.21.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.