

Por lo tanto, en un túnel donde las características del macizo rocoso están definidas, un shotcrete reforzado con fibras de acero permitirá menores deformaciones que un shotcrete reforzado con fibras que tengan menor módulo de elasticidad que el acero. Esto es muy importante, puesto que el material de refuerzo (fibra) debe brindar la condición más segura durante la operación de la mina, la cual se dará mientras las deformaciones del túnel sean las menores posibles. En los siguientes gráficos se puede observar el comportamiento del shotcrete reforzado con fibras según el tipo de material bajo las mismas condiciones (la presión del macizo rocoso  $F$  en ambos casos es el mismo). La Fig. 1 muestra el comportamiento del shotcrete reforzado con fibras de acero; mientras que la Fig. 2 muestra el comportamiento del shotcrete reforzado con fibras de menor módulo de elasticidad que el acero (fibras sintéticas):

Nótese que el desplazamiento hasta alcanzar el equilibrio, entre la posición inicial (1) y la posición final (2) del túnel, es distinto en cada caso, así como el ancho de las fisuras. Las fibras de menor módulo de elasticidad que el acero permiten mayores deformaciones, pudiéndose generar zonas vulnerables a la energía acumulada por el macizo rocoso, lo cual podría poner en riesgo la integridad de los trabajadores.

### Las fibras de acero

Como habíamos mencionado anteriormente, la principal función de las fibras es dotar de ductilidad al shotcrete, el cual junto con los pernos de anclaje, acompañarán las deformaciones generadas por la presión del macizo rocoso hasta alcanzar el equilibrio; por lo tanto, es importante que el material de refuerzo brinde la capacidad de deformación necesaria para soportar los esfuerzos con la menor deformación posible. En tal sentido, las fibras de acero constituyen una alternativa de refuerzo segura, puesto que están fabricadas con un material dúctil, con mayor capacidad de deformación y alta resistencia a la tracción, que fibras de menor módulo de elasticidad.

Las fibras de acero cuentan con deformaciones en los extremos (o "ganchos"), los cuales conforman un mecanismo de anclaje que le permiten trabajar a tracción inmediatamente después que el concreto se fisura por acción de las deformaciones generadas por el macizo rocoso.

Generalmente las fibras fabricadas con materiales de menor módulo de elasticidad que el acero, no cuentan con un sistema de anclaje mecánico, por lo que su funcionamiento dependerá del grado de adherencia con la pasta de cemento y para lograr ello es necesario adaptar la proporción de los insumos que conforman el shotcrete, principalmente se requiere aumentar la cantidad de

cemento, lo cual podría incrementar el costo global de la mezcla.

Las fibras de acero actúan como "puentes" en las fisuras, evitando que se extiendan y manteniéndolas cerradas. Esto permite que los esfuerzos se distribuyan a través del recubrimiento de shotcrete, haciendo que más fibras actúen para tomar parte de esos esfuerzos, aportando en la capacidad de soporte del sistema de manera eficiente.

El aporte de las fibras de acero en el concreto sometido a esfuerzos de flexión puede ser medido a través de ensayos de viga según EN 14488-3. La resistencia post fisura –o resistencia después de la falla del concreto– denominada resistencia residual, está estrechamente relacionada con las características de la fibra y su dosificación. Este parámetro también puede ser obtenido a través del ensayo alternativo con panel cuadrado publicado por EFNARC.

El comportamiento del shotcrete reforzado con fibras de acero puede ser representado en laboratorio mediante el ensayo de determinación de la capacidad de absorción de energía acorde con EN 14488-5 o el ensayo de panel cuadrado establecido por EFNARC. El área debajo de la curva medida hasta una deflexión de 25 mm, es la energía absorbida por el shotcrete reforzado con fibras de acero o tenacidad. Ambos parámetros: resistencia residual y tenacidad, permiten medir la ductilidad del shotcrete reforzado con fibras de acero.

