66

Máster Universitario
en Túneles
y Obras Subterráneas

ÁREA: B
MÓDULO: B

EL REFUERZO DEL HORMIGÓN PROYECTADO

Ponente: Julio Rossi
Fibre Concrete Service
Día: 22/03/07
Hora: 16:00 a 17:00

EL REFUERZO DEL HORMIGÓN PROYECTADO

JULIO ROSSI
FIBRE CONCRETE SERVICE
II MASTER EN TUNELES Y O. SUBTERRANEAS
22/03/2007

1. INTRODUCCION

1.1. El gunitado es hormigón aplicado utilizando la técnica del proyectado. De este modo, todas las características y propiedades del hormigón se aplican también para la gunita.

1.2. El hormigón es un material resistente a las fuerzas de compresión y tiene un elevado grado de durabilidad. el hormigón puede adaptarse a cualquier forma y contorno.

1.3. El hormigón, no obstante, es un material con una baja resistencia a la tracción y al cortante, comportándose de manera frágil al alcanzar la máxima resistencia.

Para superar este defecto, el hormigón debe armarse con un material apropiado.

El acero es el elemento que se utiliza más habitualmente para desarrollar un hormigón reforzado y pretensado.

2. PAPEL QUE DESEMPEÑAN LAS CAPAS DE GUNITADO

2.1. El tunelaje moderno tiende a utilizar al máximo la propia capacidad soporte del subsuelo.

Se debe aplicar un sistema de soporte adecuado para permitir que el subsuelo se mueva de un modo controlado hasta que alcance un nuevo equilibrio creando de esta manera un arco propio de soporte dentro de la roca.

El sistema de soporte consiste principalmente en gunitado, un conjunto de bulones, puntales o una combinación de estas técnicas de refuerzo.

Los puntales suelen fabricarse utilizando barras de acero. No obstante, hay una tendencia a sustituir estos puntales por puntales de hormigón reforzado, empleando la técnica del proyectado.

2.2. El gunitado es una parte esencial del sistema total de soporte.

La capa de gunita necesita tener un comportamiento elasto-plástico para seguir las deformaciones impuestas por el subsuelo, sin fallar por fragilidad.

El revestimiento de gunita debe comportarse de un modo dúctil otorgando la capacidad soporte requerida para permitir que la roca llegue a ser auto soportante.

En el caso de condiciones de roca perdida, la capa de gunita necesitar tener una resistencia al cortante suficiente para evitar que caigan bloques de roca. Esto implica también la necesidad de una fuerte adhesión entre la gunita y el terreno.

Esta fuerte adhesión se requiere para hacer que la gunita y el subsuelo trabajen juntos, dando como resultado un arco auto soporte. El gunitado, sin embargo, es un material cementicio y sujeto a contracción.

Las fisuras por contracción pueden causar la desadhesión de la capa de gunita que, sin embargo, no puede actuar por sí misma y podría cargarse en condiciones para las que no ha sido diseñada. El control de fisuración es un dato importante a tener en cuenta.

2.3. La gunita también puede emplearse como revestimiento final.

La capa final es más un revestimiento que una parte del sistema de soporte.

Una capa de revestimiento final facilita una superficie más regular que puede mejorar la ventilación de vapor de aire, reduciendo el coste de energía. Utilizando un tipo de cemento apropiado el color ligero de la superficie ayudará a reducir la potencia requerida para el alumbrado del túnel. Una superficie regular facilita también la limpieza del revestimiento del túnel.

Utilizando un método de escudo único, hay una necesidad de tener una total adherencia entre las diferentes capas para construir un único escudo.

Esto también significa que al contrario que en el método doble de escudo, no puede construirse ninguna membrana impermeable para evitar filtraciones de agua.

De este modo hay una necesidad de alto grado de impermeabilidad del material gunitado aplicado y una construcción libre de fisuras. El control de fisuración es un elemento importante que determina el grado de durabilidad de la totalidad de la construcción.

3. MATERIALES DE REFUERZO

3.1. Las capas de gunita en las construcciones subterráneas están sujetas a resistencias a tracción inducidas por::

- carga a flexión
- cortante
- contracción

Hay una necesidad de otorgar al hormigón proyectado lo siguiente:

- resistencia a flexión
- ductilidad
- resistencia al cortante
- resistencia a la fisuración

El hormigón no tiene estas propiedades y necesita ser reforzado con un material apropiado para dar a la estructura del hormigón el comportamiento adecuado.

3.2. El hormigón debe reforzarse con un material adecuado. Los dos componentes básicos deben formar un composite duradero que, bajo todas las circunstancias, dé resistencia y ductilidad.

La durabilidad está particularmente en relación con la perfecta adhesión entre la matriz básica y el refuerzo, también bajo condiciones cambiantes.

3.3. La principal propiedad del refuerzo es absorber las fuerzas de tracción. el acero es el material más ampliamente utilizado, dado que combina una alta resistencia a tracción y un alto módulo de Young.

Una alta resistencia a la tracción permite absorber las fuerzas de tracción altas y un alto módulo de Young facilita un óptimo control de fisuración, ya que las fisuras inducidas se mantienen cerradas.

La durabilidad del compuesto se garantiza por una buena adherencia, debido a que el movimiento térmico del acero y del hormigón son iguales.

El refuerzo de acero está disponible como barras, malla y fibras.

3.4. La corrosión ha sido siempre - y hasta cierto punto todavía es - la principal preocupación respecto a la durabilidad del hormigón reforzado con acero.

El acero empieza a corroerse cuando está en contacto con agua y oxígeno. Este proceso envuelve la expansión del volumen del acero, que puede dañar al hormigón y llevar a la fractura. El acero expuesto se corroe más y más rápidamente.

A fin de evitar este inconveniente, se han efectuado muchas investigaciones para desarrollar productos sintéticos de refuerzo libres de corrosión.

Se han empleado fibras de vidrio en el pasado, pero necesitan un tratamiento especial para protegerlas contra el entorno alcalino de la matriz del hormigón.

Se han empleado también fibras PP de monofilamentos o fibriladas, como refuerzo secundario de hormigón, principalmente para el control de fisuración y la mejora de la durabilidad. Más recientemente fibras estructurales PP se han sido introducidas para dar una mayor resistencia al hormigón.

Se están llevando a cabo más investigaciones con otros materiales sintéticos. Particularmente el polietileno parece ser un material muy eficaz para producir fibras para el refuerzo del hormigón proyectado.

4. TIPOS DE REFUERZO

4.1. El refuerzo debe colocarse donde están inducidas las fuerzas a tracción.

Las fuerzas de tracción pueden desarrollarse como resultado de:
- Carga a flexión bajo los movimientos impuestos del terreno
- cortante debido a los movimientos de bloques de rocas
- fuerzas de tracción de la contracción del hormigón

4.2. Al contrario que en las aplicaciones estructurales, en las condiciones subterráneas es muy difícil, incluso imposible, predecir la posición exacta y la localización de dónde estas fuerzas de tracción pueden tener lugar.

Solo en una roca muy estable, donde un refuerzo se necesita solamente para el control de fisuración y durabilidad o por razones de impermeabilización, una capa de refuerzo podría ser suficiente únicamente para el control de fisuración.

En otras circunstancias, las fuerzas de tracción pueden tener lugar tanto en el intrados como en el extrados. Para absorber todas las fuerzas de tracción se requieren dos capas de refuerzo o una distribución homogénea de fibra.

Al emplear una malla y o barras, se debe tener un especial cuidado para instalar el refuerzo en el lugar correcto.

Especialmente al utilizar barrena o taladro, la sección de cruce excavada puede ser muy irregular, haciendo que sea complicada la localización del refuerzo en su posición correcta.

Aquí hay necesidad de una primera capa de sellado para nivelar las irregularidades de la sección de cruce.

5. COMPORTAMIENTO DE REFUERZO

5.1. El grado de comportamiento depende de :

- el material de refuerzo
- la cantidad de refuerzo
- la posición del refuerzo

5.2. En las construcciones subterráneas el diseño estructural es una operación difícil, particularmente cuando se construye un túnel utilizando el método observacional.

Es muy difícil predecir dónde y cuando van a producirse las fuerzas de tracción.

Como la seguridad es el elemento más importante en las construcciones subterráneas, el comportamiento dúctil de la estructura soporte debe garantizar la seguridad del personal del túnel.

Como el diseño solo puede dar una indicación aproximada del comportamiento estructural y los ensayos tradicionales solo dan al material propiedades para poner en un software, el efectuar un ensayo adecuado para verificar la calidad estructural de un sistema de soporte, es una herramienta muy útil.

5.3. La Compañía de Ferrocarriles Franceses en colaboración con el Sr. G. Durand (de Alpes Essais) ha desarrollado un ensayo de placa, verificando el comportamiento del sistema del anclaje de los bulones - gunita bajo carga a flexión y a cortante.

5.4. Este ensayo permite verificar la capacidad soporte de carga para una deformación impuesta y controlar la capacidad de absorción de energía bajo grandes deformaciones.

Pueden ensayarse y compararse diferentes sistemas de refuerzo y establecer un criterio de comportamiento para los diferentes tipos de túnel y de condiciones de terreno.

6. CONCLUSION

6.1. El hormigón proyectado es una parte importante de la técnica moderna de construcción de túneles.

6.2. El hormigón proyectado tiene las buenas propiedades del hormigón, pero sufre también de una baja resistencia a la tracción y de fragilidad.

6.3. Las capas de hormigón proyectado, que forman parte del sistema de soporte del subsuelo, debe dar ductilidad y una óptima adhesión.

El hormigón proyectado debe reforzarse con un material apropiado que otorgue:

- ductilidad
- control de fisuración
- durabilidad

El acero ha sido hasta el momento el más frecuentemente utilizado para el refuerzo.

Recientemente se han introducido también algunos productos sintéticos.

FIBRAS DE ACERO

JULIO ROSSI
FIBRE CONCRETE SERVICE
II MASTER EN TUNELES Y O. SUBTERRANEAS
22/03/2007

1. INTRODUCCION

La gunita sin reforzar, al igual que el hormigón sin reforzar, es un material relativamente frágil, con poca capacidad para resistir fuerzas a tracción sin fisurarse o romperse.

Inicialmente la gunita era aplicada tanto en masa como reforzada con acero de refuerzo convencional, malla soldada, o incluso en algunas ocasiones, malla de cadenas. No fue, sin embargo, hasta principios de los años 70 que se efectuó el primer trabajo experimental con gunita reforzada con fibras de acero (GRFA).

Desde entonces la GRFA se ha empleado de forma extensiva en la mayor parte de las naciones industrializadas del mundo, para una gran variedad de aplicaciones. Las utilizaciones de GRFA van desde la estabilización de taludes, hasta el soporte del terreno subterráneo, pasando por la rehabilitación estructural y la construcción estructuras de bóvedas y domos.

2. GRFA

2.1. Definición

La GRFA se define como un mortero u hormigón, que contiene fibras de acero discontinuas y discretas, que se proyecta neumáticamente a la superficie, a una alta velocidad.

2.2. Fibras de acero

2.2.1. Las fibras de acero se añaden al hormigón para mejorar la absorción de energía, la resistencia al impacto y para darle ductilidad.

2.2.2. Las fibras de acero para uso en gunita están disponibles en un número de formas, tamaños y tipos de metal.

Se emplea una variedad de procesos diferentes para fabricar las fibras de acero, incluyendo:

- alambre cortado en frío
- chapa cortada
- proceso de extracción de mezclas
- fibras de acero fundidas

Los parámetros más útiles para describir las fibras, han resultado ser:

- el índice de aspecto
- la forma geométrica
- la resistencia a tracción

2.2.3. La longitud de la fibra de acero tiene que ser en una escala de 3 veces el tamaño del árido mayor, para hacer de puente de la distancia entre dos áridos, donde la fisura acostumbra a comenzar.

La longitud de la fibra debe ser también suficiente para dar la adhesión necesaria a la matriz y evitar arrancamientos demasiado fácilmente.

Teniendo en cuenta que la gunita se mezcla a menudo con áridos de un máximo de 10 ó 12 mm, las fibras de acero necesitar ser de 30 a 35 mm de longitud.

2.2.4. Un diámetro pequeño aumenta el número de fibras por unidad de peso y hace más denso el entramado de fibras. El espaciamiento de la fibra se reduce cuando la fibra es más fina y el refuerzo de la misma se vuelve más eficiente.

Para conseguir un refuerzo homogéneo, el espaciamiento (s) entre fibras, que se calcula como:

24600

$$s = \sqrt[3]{\frac{R \cdot d_f^2 \cdot l_f}{4 e_f}}$$

debe ser inferior a 0,45 l_f, donde :

- e_f es el volumen de fibras (≥ 20 kg/m3)
- l_f es la longitud de fibras
- d_f es el diámetro (equivalente) de la fibra

Tabla 1 indica la dosificación mínima para los diferentes tipos de fibra (longitud y diámetro) requeridos para encontrar el límite de espaciamiento.

l_f (mm) / d (mm)	25mm s=11.25mm	30mm s=13.50mm	35mm s=15.75
0.45	22	20	20
0.50	27	20	20
0.55	33	23	20
0.60	39	27	20
0.80	69	48	35

Tabla: dosificación mínima de la fibra de acero (kg/m3) requerida para encontrar el límite de espaciamiento

37

2.2.5. Las fuerzas a tracción inducidas en la gunita se transfieren a las fibras de acero gracias a las características de la adhesión duradera entre ambos materiales básicos.

La adherencia puede mejorarse, intensificando el anclaje mecánico y escogiendo una forma adecuada de fibras de acero. Extremos conformados, extremos alargados, alambre ondulado, ... son diferentes formas disponibles en el mercado.

Una transferencia de carga eficiente dará como resultado una resistencia a tracción alta en un diámetro pequeño de la fibra de acero. Las fibras de acero eficientes necesitan tener una alta resistencia a la tracción para evitar la fractura de las fibras. La capacidad resistencia a la carga después de que la gunita se haya fisurado, garantiza el grado de ductilidad.

Las fibras de acero deben tener una resistencia mínima a la tracción de 800 Mpa.

La utilización de gunita de alta resistencia en revestimientos finales de larga vida de construcciones subterráneas, han intensificado la necesidad de desarrollar fibras de acero de alta resistencia a la tracción.

2.2.6. Las fibras de acero de diferentes tamaños y formas tienen, todas ellas, su propio efecto en el comportamiento y calidad de la gunita.

La dosificación de fibras de acero requerida para cumplir con el diseño y las especificaciones estructurales debe relacionarse con el comportamiento de las fibras de acero.

Los aspectos más importantes de control del comportamiento de las fibras de acero en la gunita son:

- el índice de aspecto
- el volumen concentración
- la forma geométrica

Cuanto más alto sea el índice de aspecto y el volumen de concentración (dosificación) de una fibra de acero de alta resistencia, mejor será el comportamiento de la GRFA con respecto a la ductilidad y a la resistencia a la fisuración.

La combinación de :

- una longitud de fibra mínima, dependiendo del tamaño de los áridos.
- un diámetro bajo de la fibra, dando un espaciamiento pequeño entre fibras.

requiere una fibra de alta resistencia.

Es recomendable dividir las fibras de acero en tres categorías de comportamiento:

aspect ratio ($^{l}/d$)	45	comportamiento standard
	65	buen comportamiento
	80	comportamiento superior

3. TRABAJABILIDAD DE LA GRFA

3.1. Mezclado y carga

3.1.1. No se necesitan efectuar cambios especiales para los diseños de mezcla de gunitas convencionales para utilizar fibras de acero. Las mismas características que son inherentes al diseño de la mezcla de gunita (bajo contenido en áridos y alto contenido en materiales cementicios) contribuyen también a un buen mezclado, dispersión y aplicación de la GRFA y de también del comportamiento de la GRFA endurecida.

3.1.2. La GRFA tiene también las mismas dos técnicas de aplicación primarias - vía húmeda y vía seca.

La VÍA SECA puede procesarse, mezclarse y suministrarse por cualquiera de los siguientes procesos:

- mezclado central en una cuba rotatoria o mezcladora antes de descargarse en un mezclador de tránsito, camión volquete, cinta transportadora u otros medios de alimentar la gunitadora.
- El mezclado de tránsito, con las fibras añadidas directamente al camión de mezcla preparada, junto con el material a alimentar, o separadamente como último componente.
- Mezcla seca en sacos con fibras de acero dentro.

La VIA HÚMEDA puede procesarse, mezclarse y suministrarse esencialmente a través de los mismos procesos adecuados para suministrar el hormigón convencional, por ejemplo: mezcladora central, mezclado de tránsito o procesador volumétrico, utilizando unidades de mezcla móviles o equipo adecuado.

Las fibras de acero se añaden tanto a la planta de hormigón, durante el cargado de los otros ingredientes, o por separado a la mezcladora de tránsito de la obra.

3.1.3. Utilizando un equipo dosificador de fibras de acero, estas pueden ser automáticamente pesadas y posteriormente añadidas as la mezcla de hormigón.

Las fibras de acero de cajas o Big-bags, se echan en un contenedor. El peso deseado de las fibras de acero se indica en el instrumento de pesado o se alimenta directamente en la computadora de mezclado. El alimentador de dosificación dispersa entonces las fibras de acero y las alimenta en un flujo continuo para mezclarlas en la carga del hormigón. Cuando se alcanza la cantidad deseada, el alimentador para automáticamente.

3.1.4. Las fibras sueltas con un índice de aspecto alto tienen dificultad en dispersarse y necesitan un equipo especial para alcanzar una distribución homogénea y evitar la aparición de bolas o erizos.

Las fibras de acero pueden encolarse con una cola soluble al agua, en peines de 30 a 50 fibras para facilitar la manipulación y mezclado.

Las fibras de acero individuales tienen un índice de aspecto alto, pero como están encoladas en peines, son aproximadamente del mismo tamaño que los otros áridos.

Los peines pueden ser añadidos como aditivos extras. Tan pronto como el proceso de mezclado empieza, estos peines se esparcen inmediatamente a través de la masa entera y debido a la acción de la humedad de la mezcla y también al efecto de corrosión de los áridos, se separan en fibras individuales de alto índice de aspecto.

3.1.5. Se debe prestar especial cuidado al añadir las fibras de acero, para evitar la tentación de retemperar excesivamente la gunita con agua.

La GRFA aparecerá más rígida que el hormigón en masa convencional y mostrará un menor cono después de la adición de la fibra, cuando se ensaye utilizando el ensayo standard del Cono de Abrahams.

La apariencia visual y el ensayo de Cono de Abrahams no son, sin embargo buenos indicadores de la verdadera trabajabilidad de la GRFA. Las mezclas que aparecen rígidas y tienen un cono de medida baja pueden todavía bombear y proyectar bien. El excesivo retemperado con agua puede tener efectos negativos en la resistencia de la GRFA. Si la trabajabilidad requerida tiene que incrementarse utilizando los aditivos adecuados.

3.1.6. El emplazamiento de la GRFA es básicamente el mismo que se aplica a la gunita no reforzada.

4. PROPIEDADES DE ENDURECIMIENTO

4.1. DUCTILIDAD

4.1.1. Las fibras de acero transforman la gunita de un material frágil a un material altamente dúctil. La tenacidad es una característica importante que otorga al revestimiento de GRFA una alta capacidad soporte por efecto de las redistribución de las cargas.

4.1.2. Para poder cuantificar los beneficios de la adición de fibras, se ha desarrollado una variedad de diferentes sistemas de medida en diferentes países.

Uno de los sistemas empleados es la tenacidad a flexión que determina la carga versas la respuesta a la deformación de una viga sujeta a deformación. A partir de esto, el área bajo la curva se determina (como cantidad de energía) y mayoritariamente se traslada en un parámetro de índice absoluto o en uno sin dimensiones.

Los dos sistemas más antiguos son la norma Amerina (ASTM-C1018) y el código Japonés (JSCE-SF4)

ASTM C1018 (USA).

Los índices de tenacidad se determinan en el índice de absorción de energía entre la primera fisura y la primera fisura relacionada a las deformaciones.
Es muy complicado establecer una medida exacta de la primera deformación de fisura y debido al comportamiento incierto del equipo de ensayo en el nivel de fisuración los resultados pueden ser completamente erróneos o manipulados.
D. Wood de este modo recomendó saltar los índices I_5 y I_{10} y usar índices de tenacidad más altos (I_{20}, I_{30} y I_{60}).

Los factores de índice de Tenacidad se definen como::

$$R_{30,10} = 5\ (I_{30} - I_{10})$$

$$R_{50\ 30} = 5\ (I_{50} - I_{30})$$

Los valores recomendados para ambos factores de tenacidad están en el rango de 50 – 75 respectivamente.

JSCE SF 4 (Japón).

La **resistencia equivalente a flexión** se define como el valor promedio de la capacidad portante de la gunita reforzada con fibras de acero considerando grandes deformaciones.

Una gran parte del diagrama de la curva carga-deformación se tiene en cuenta, dando una mejor idea real del comportamiento a ductilidad.

La resistencia equivalente a flexión es un material característico el cual debe ser aplicado con el método de diseño apropiado.

Esto requiere, de todos modos, asumir correctas premisas de diseño, como son las condiciones de carga del terreno, y las dimensiones del sostenimiento. Las

recomendaciones de DBV alemana, ha publicado un método de diseño basado en los momento y fuerzas normales (MN-Method) usando la resistencia equivalente a flexión.

4.1.3. El ensayo de viga, sin embargo, no es el ensayo más apropiado para simular la acción de membrana que hace una capa de gunita reforzada con fibras de acero.

Es muy difícil asumir premisas de diseño con las capas de gunita que tengan una buena posibilidad de ser correctas con las condiciones reales.

Debido a la irregularidad de la superficie de la roca, el espesor varía muchísimo y los movimientos del terreno son muy difícil de predecir. Como las capas de gunita se comportan mucho mejor como una capa delgada que como una capa gruesa, no es del todo obvio sacar información del comportamiento de estas capas con los ensayos de viga.

De todas formas, la primera función de una primera capa es a ayudar al terreno a estabilizarse y a encontrar un nuevo estado de equilibrio.

El programa de ensayos Noruego (1.982) describió claramente las condiciones de soporte de las gunitas combinadas con pernos. Ensayos de placa , permiten la redistribución de las cargas por modelización del comportamiento dúctil de las GRFA en condiciones hiperestáticas, dando valores buenos y confiables para caracterizar la capacidad de carga de las capas.

Un ensayo apropiado ha sido desarrollado en Francia por la Compañía Nacional de FFCC franceses y G. Durand (Dueño del Laboratorio Alpes Essais).

Este ensayo de placa fue publicado en las recomendaciones de la EFNARC.(Federación Europea de las Asociaciones Nacionales de Constructores Especialistas y Suministradores de Material para la Industria de la Construcción)

El ensayo de placa consiste en apoyar la placa en sus cuatro bordes y aplicar una carga en el centro a través de una superficie de contacto de 10 x 10 cm. La curva carga deformación, se registra hasta que la carga llegue a una deflexión de 25 mm. Del registro de esta curva se obtiene una segunda curva que es resultado de la energía absorbida en Joules, en función de la deformación ó deflexión.

El ensayo francés trata de simular el comportamiento real de la capa y nos da una muy buena idea de la capacidad portante y absorción de energía de las capas de gunita.

A pesar de determinar las características del material, el cual requiere un modelo de diseño adecuado afín de calcular las permitidas solicitaciones de la estructura, el ensayo francés permite realizar esto y además verificar inmediatamente la absorción de energía y la capacidad portante de la capa.

Valores numéricos a recomendar cuando se obtienen del correspondiente ensayo de placa usando distintos tipos de malla, las cuales han probado en el pasado que son suficientes bajo condiciones de carga.

Basado en este ensayo de placa usualmente se definen tres clases de GRFA:

500 Joules	para suelos/rocas en buenas condiciones.
700 Joules	para suelos/rocas en condiciones medianas.
1000 Joules	para suelos/rocas en condiciones difíciles.

Para la misma matiz de gunita/hormigón, la cantidad de energía absorbida es significativamente influenciada por el tipo de fibra, (e.j: el aspecto/esbeltez, longitud y diámetro) y la dosis de fibras. A mayor aspecto ó esbeltez y a mayor dosis de fibras tenemos mejor comportamiento de la GRFA.

El ensayo de placa es mucho más apropiado que el ensayo de viga para determinar el comportamiento de la GRFA:

(1) : La placa se corresponde mucho mejor que una viga con la situación real de la capa de un túnel; el soporte de la placa en sus cuatro bordes simula la continuidad de la capa de gunita.

(2) : Como en la realidad , las fibras de acero actúan en dos direcciones y no en una sola dirección, como es el caso del ensayo de viga, el efecto de refuerzo de una placa es muy similar al real comportamiento de la capa de GRFA.

(3) : La GRFA puede ser comparada muy fácilmente con una malla de refuerzo colocada en las mismas condiciones que en obra, y puede ser ensayada de la misma forma que las fibras.

4.2. CONTROL DE FISURAS

La densidad de fibras de acero crean una red dentro de la matriz de gunita permitiendo absorber las tensiones en cualquier punto.

Para lograr un refuerzo homogéneo el espacio entre fibras debe ser menor que 0,45 l_f donde l_f es la longitud de las fibras.

Para una longitud de fibra dada, el espacio depende de la dosis y de su diámetro.

El control de fisuras requiere:

- Una mínima longitud de fibra de acero, lo cual para la gunita está en el rango de 30 – 35 mm ;

- Diámetros pequeños mantienen el espacio entre fibras reducido.

Consecuentemente, las especificaciones para controlar la fisuración deben pedir un mínimo de longitud de fibra y una máxima separación entre fibras y no una dosis mínima (e,j: 40 kg/m3).

4.3. OTRAS PROPIEDADES

4.3.1. Dosis habituales de fibras de acero (40 – 50 kg/m3), los esfuerzos mecánicos del hormigón (compresión, flexión, tracción) son marginalmente aumentados.

4.3.2. La razón fundamental para incorporar las fibras de acero en el hormigón ó gunita es para cambiar el comportamiento de frágil a dúctil. Las fibras de acero confieren a la gunita un comportamiento dúctil inclusive en compresión.

4.3.3. La GRFA también tiene una mejor resistencia al impacto lo cual provee a la primera capa de gunita un mejor comportamiento a la próxima voladura.

5. GRFA VERSUS MALLA REFORZADA CON GUNITA

Uno de los factores que hacen que la GRFA sea particularmente atractiva a los Contratistas es la posibilidad de eliminar la malla.

Fijar la malla a la roca es difícil, lleva bastante tiempo es decir que cuesta más y aveces es una hazaña fijarla.

Otra de las ventajas es que la GRFA sigue exactamente el contorno de la roca, inclusive aún con una superficie excavada regular, la malla es fijada mayoritariamente a los puntos sobresalientes. Quedan por detrás grandes depresiones que luego son cubiertas por unas más pequeñas

La malla como refuerzo de la gunita necesita de 30 a 50 mm de cobertura, afín de llenar todos los huecos que quedan detrás de la malla. El llenado de los huecos detrás de la malla, lleva una cantidad de gunita extra, mucho más que la requerida por la especificación del espesor mínimo. A veces también acontece que la malla queda sin recubrir.

Con la GRFA no se necesita más una malla encapsulada con gunita.

Una impropia técnica de gunitado puede costar demasiado.

Si la presión correcta no es usada por el gunitador, si no realiza la proyección a una distancia correcta de la roca, la gunita se puede acumular en la superficie de la malla, dejando huecos detrás y puntos de con arena sola.

La falta de pegado de la gunita a la roca, hará que la gunita se deteriore muy rápidamente y el refuerzo de la malla se oxide especialmente si queda expuesta al la presencia de agua, atmósferas agresivas ó congelamiento.

El hierro de la malla causa mucho mayor rechazo de los áridos más grandes, creando una calidad muy inferior de la gunita por detrás de los hierros y un dren preferencial para la presencia de agua del terreno. El tamaño mayor de los áridos, golpean la malla haciéndola vibrar, haciendo un efecto negativo en el pegado de la capa de gunita a la roca. De cualquier forma el pegado es un parámetro esencial en la eficiencia de la capa de gunita.

Otra gran ventaja de la GRFA es su composición homogénea. Lo cual permite resistir las tensiones y esfuerzos de corte en cada una de las secciones transversales de la capa.

Una ventaja consiguiente es que permite una aplicación inmediata de una capa de consolidación, una adecuada protección a la roca. Particularmente cuando se usa el robot, una capa de gunita puede ser aplicada fuera del are de peligro.

6. ESPECIFICACION DE LA GRFA

6.1. Debido a los esfuerzo de las numerosas partes envueltas en el desarrollo de la gunita, ha comenzado a considerarse como un material de alta calidad y que puede ser utilizado con propósitos estructurales.

La calidad requiere la comprobación de las características relevantes relacionadas con la aplicación del material.

Las especificaciones deben solicitar valores numéricos que deben ser obtenidos a través de métodos apropiados de ensayos.

Las propiedades de las GRFA dependen principalmente de las características específicas de las fibras de acero. Las fibras de acero deben tener una etiqueta de calidad.

6.2. Las especificaciones de las GRFA tienen que indicar :

- Mínima longitud de la fibra (30 – 35 mm 3 veces el tamaño árido máx.)
- Aspecto ó Esbeltez (rango entre 45 – 80)
- Resistencia mínima a tracción (mínima 1.000 Mpa)
- Comportamiento a ductilidad (500 – 700 – 1000 Joules)

II MASTER EN TÚNELES Y OBRAS SUBTERRANEAS

SOSTENIMIENTO Y REVESTIMIENTO FINAL DE TÚNELES

CÁLCULO ALTERNATIVO CON FIBRAS DE ACERO

SOLUCIÓN ALTERNATIVA DE HORMIGÓN GUNITADO REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO.

El cálculo se hace a base de la equivalencia de los momentos de flexión que pueden absorber ambas soluciones.

SOLUCIÓN DE PROYECTO (REVESTIMIENTO)

Empezaremos por considerar primero el Revestimiento y luego la gunita de sostenimiento.
El Revestimiento es de 35 cm de espesor y con una resistencia de un H-250, en todas las secciones.
En este caso tenemos entonces que la Resistencia a Flexión última de un H-250 y 35 cm de espesor es:

Aplicando la fórmula: $f_u = 0{,}393\ \sqrt[3]{fck}$ siendo fck = 25 N/mm2 la resistencia solicitada del Hº.

$$f_u = 0{,}393\ \sqrt[3]{25} = 3{,}79\ N/mm^2 = 37{,}9\ kg/cm^2 .$$

Entonces el Momento Resistente de la sección es: $M_p = \frac{fu}{s} \times b \times \frac{d}{6} =$

f_u = resistencia a la flexión última.
S = coeficiente de seguridad para el hormigón en masa.
b = ancho del área de carga = 100 cm.
d = espesor del revestimiento de Hº = 35 cm

Reemplazando: $\frac{37{,}9 kg/cm2}{3} \times 100\ cm \times \frac{35cm}{6} = 257.930\ kgcm/m$.

Dicho momento deberá ser absorvido por la solución alternativa con fibras de acero.

SOLUCION ALTERNATIVA CON DRAMIX (REVESTIMIENTO)

El cálculo del refuerzo con fibras de acero, se realiza considerando al hormigón con fibras como un material homogéneo. El valor máximo de Flexión se calcula con la fórmula:

$\sigma_{máx} = \frac{M}{L}$ siendo M_p = momento resistente de la sección ; L = es el módulo de la sección en la sección de fisura, $\frac{1}{6}$ x b x d ancho y alto de la sección cargada.

Reemplazando y despejando: $M_p = \frac{1}{6} \times b \times d^2 \times \sigma_{máx}$

Siendo : $\sigma_{máx} = f_e$ Resistencia Equivalente a flexión con fibras de acero

Tenemos entonces que el espesor de la gunita con fibras de acero, capaz de absorver el Momento Resistente es:

Despejando: $d = \sqrt{\frac{Mpx6}{bxfe}}$

En el caso de las gunitas, tenemos que el módulo de rotura de la misma (fu) es de 40 kg/cm2. Si le agregamos 40 kg/m3 de fibras de acero ZP 305, la resistencia equivalente a flexión será:

$f_e = f_u \times 0{,}65 = 40\ kg/cm^2 \times 0{,}65 = 26\ kg/cm^2$

Utilizando entonces la fórmula de espesores, podemos determinar la solución equivalente al revestimiento de hormigón.

$D_{35} = \sqrt{\frac{257.930 kgcm/mx6}{100cmx26kg/cm}} = 25\ cm$

Es decir que los 35 cm de hormigón en masa, podemos reemplazarlos por 25 cm de hormigón armado con 40 kg/m3 de gunita con fibras de acero ZP 305.

Consideraremos las soluciones de gunita con malla y le daremos una solución con fibras de acero con igual criterio al desarrollado.

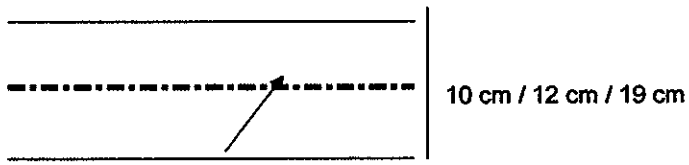
SOLUCION DE PROYECTO (SOSTENIMIENTO)

Las capas de gunita tienen un espesor que varían según sean las secciones. En el caso de la sección A no lleva gunita, el de la sección B son 3+7 cm y viene reforzada con una malla (150 x 150 Ø 6), la sección C son 5+7 con igual malla y

por último la D son 5+7+7 y con igual malla. La sección de acero de dicha malla es de A = 1,88 cm^2/m.

Vistos los problemas que hay para colocar el mallazo, no se puede contar con una posición regular y uniforme dentro de la capa de gunita: la malla viene colocada contra los puntos sobresalientes de la roca y estará en la parte exterior de la capa de gunita en las zonas donde hay grandes huecos detrás de la malla.

Por estos motivos, la posición más favorable de la malla - desde el punto de vista teórico - está en el centro de la sección de la capa de gunita. Sólo en el caso de 2 mallazos, se puede contar con todo el espesor.



Malla (150 x 150 Ø 6)

$\xi = 0{,}90$
$h = 10 - 5 = 5$ cm
$A_{acero} = 1{,}88\ cm^2/m$
$\sigma_a = 4000\ kg/cm^2$

$$M = \xi \times e \times \sigma_a \times A_{acero}$$

$M_B = 0{,}9 \times 5\ cm \times 4000\ kg/cm^2 \times 1{,}88\ cm^2/m = 33.840$ kgcm/m

$M_C = 0{,}9 \times 6\ cm \times 4000\ kg/cm^2 \times 1{,}88\ cm^2/m = 40.608$ kgcm/m

$M_D = 0{,}9 \times 9{,}5\ cm \times 4000\ kg/cm^2 \times 1{,}88\ cm^2/m = 64.296$ kgcm/m

SOLUCIÓN ALTERNATIVA CON FIBRAS DE ACERO DRAMIX®

Si consideramos las momentos resistentes del sostenimiento calculadas con malla y el del hormigón en masa, tendremos:

$M_{r\text{-}A} = 257.930$ kgcm/m

$M_{r\text{-}B} = 33.840$ kgcm/m + 257.930 kgcm/m = 291.770 kgcm/m

$M_{r\text{-}C} = 40.608$ kgcm/m + 257.930 kgcm/m = 298.538 kgcm/m

$M_{r\text{-}D} = 64.296$ kgcm/m + 257.930 kgcm/m = 322.226 kgcm/m

Calculamos la solución alternativa con fibras de acero Dramix, es decir el espesor de la gunita con fibras para soportar los momentos totales de sostenimiento más revestimiento.

Dado que la propiedad más importante de la gunita reforzada con fibras es la DUCTILIDAD, calculamos con la Resistencia Equivalente a Flexotracción (REF).

Del Diagrama de Identidad para las fibras ZP 30/.50, obtenemos que: fe (REF) es de:

40 kg/m^3 de ZP 305 --> fu = 40 kg/cm^2

fe = 0,65 x 40 kg/cm^2 = 26 kg/cm^2

d_A = 25 cm

$d_B = \sqrt{(6M / b.fe)} = \sqrt{(6x291.770) / (100x26)} =$ **26 cm**

$d_C = \sqrt{(6M / b.fe)} = \sqrt{(6x298.538) / (100x26)} =$ **26 cm**

$d_D = \sqrt{(6M / b.fe)} = \sqrt{(6x322.226) / (100x26)} =$ **27 cm**

CARACTERÍSTICAS DE LA FIBRA DRAMIX®:

Tipo de fibra	**Longitud**	**Diámetro**	**Forma geométrica**	**Resistencia a tracción**
ZP 305	30 mm	0,5 mm	extremos conformados	1150 N/mm^2

las fibras vienen encoladas en peines para facilitar una mezcla sencilla y sin problemas, garantizando una distribución homogénea.

PROPUESTA

Solución proyecto		**Solución alternativa con fibras Dramix®**	
Espesor	**Malla (sostenimiento)**	**Espesor**	**Dosificación**
0 cm + 35 cm		25 cm	40 kg/m^3 de ZP 305
10 cm + 35 cm	(150 x 150 Ø 6)	26 cm	40 kg/m^3 de ZP 305
12 cm + 35 cm	(150 x 150 Ø 6)	26 cm	40 kg/m^3 de ZP 305
19 cm + 35 cm	(150 x 150 Ø 6)	27 cm	40 kg/m^3 de ZP 305

Es importante destacar que con el uso de las fibras de acero, reduciremos las operaciones con respecto a la solución de proyecto, sin perder las condiciones de seguridad en la ejecución. Además si se quiere evitar por condiciones de

funcionamiento, algunas fibras que puedan quedar en la superficie, se recomienda, gunitar sin fibras un mínimo de dos cm.

COMENTARIO FINAL

La presente justificación técnica es válida exclusivamente para las fibras de acero DRAMIX®.

Se recomienda, para otros tipos de fibras metálicas, exigir garantías suficientes, tanto de la dosificación necesaria para una misma capacidad resistente, como del grado de homogeneidad conseguida en la mezcla.