

## Revestimiento de canales con sistema celular y concreto lanzado en proyectos mineros

### Channel revetment with cellular confinement system and shotcrete in mining projects

Gustavo Fierro Rojas, Gerente Técnico de Tecnología de Materiales S.A., Lima , Perú

---

#### ABSTRACT

There has been an important development in the use of cellular systems for the lining of channels. In the case of mining in Peru and the location and topographic configuration, the management of rainwater or other fluids that need to be conducted as open channels, have benefited from the introduction of this technique.

To date, quantities that exceed more than 1000 km of channels have been built in many mining units in Peru since its introduction in the late 1990s.

Currently, the lack of physical space together with an improvement in cost efficiency in construction has led to the application of an interesting variant that has proven to be very useful for the desired purpose, which is the use of a concrete filling system launched. .

The theory and details that regulate this type of applications are presented below.

#### RESUMEN

Ha existido un desarrollo importante en el empleo de sistemas celulares para el revestimiento de canales. En el caso de la minería y por la ubicación y configuración topográfica, el manejo de aguas de lluvia u otros fluidos que necesitan ser conducidos de modo abierto, se han beneficiado con la introducción de esta técnica.

A la fecha ya se ha construido cantidades que superan más de 1000 km de canales en muchas unidades mineras en el Perú desde su inicio aproximadamente a finales de la década de los 90's.

Actualmente la falta de espacio físico junto con una mejora en la eficiencia de costos en la construcción ha dado lugar a la aplicación de una variante interesante que ha mostrado ser muy útil para el propósito deseado que es el empleo de un sistema de llenado con concreto lanzado.

Se presenta a continuación la teoría y detalles que regulan este tipo de aplicaciones.

**Keywords:** Geocell, Channel Revetment, Shotcrete, Design Method, Hydraulics, Channel Construction, Geosynthetics, Cellular Confinement System.

**THEME:** Geosynthetics in Hydraulic Applications Geosynthetics in Mining Applications.

#### 1. EL REVESTIMIENTO DE CANALES CON GEOCELDAS EN MINA

Ya hace algo de 20 años que se inició en Perú la construcción de canales en minería. Una de las primeras mineras que empleó esta modalidad fue Minera Yanacocha; luego de que la empresa consultora Knight Piesold determinara las ventajas comparativas frente al empleo de un revestimiento de concreto o hasta un revestimiento del tipo grouted rip rap.

El no emplear juntas y tener un avance rápido en obra fueron los temas iniciales que inclinaron su cada vez más rápida aceptación.

##### 1.1 *El modo clásico de revestimiento de canales con geoceldas y vertido de concreto por gravedad*

El modo clásico fue el empleo de estacas para la fijación de la geocelda y la eventual o no necesidad de un geotextil debajo de la geocelda antes del vertido del concreto. La Figura 1 muestra una situación clásica de este tipo de aplicación.



Figura 1. Canal tradicional con Geocelda y Concreto.

Sin embargo, el problema surgía cuando no se podían clavar las estacas de hierro o si se colocaban, pero el suelo era demasiado suelto o poco denso y la longitud de estaca era insuficiente. De ello muchos problemas se han generado al no disponer de una mecánica de suelos muy detallada como para realizar un detallado de tipo de estacas por sectores.

Otro problema son los límites hasta que inclinación se pueden colocar geoceldas en las paredes de los canales para luego poder colocar concreto.

### 1.2 El modo actual de trabajar el revestimiento de canales con geoceldas

En la actualidad se está empezando el empleo de un tensor multiaxial para poder eliminar el uso de estacas y realizar una instalación más rápida y sin el problema de los cambios de tipos de suelo en la base de los canales.

Las Figuras 2 y 3 muestran la mejora al respecto para su empleo en obras de revestimiento.

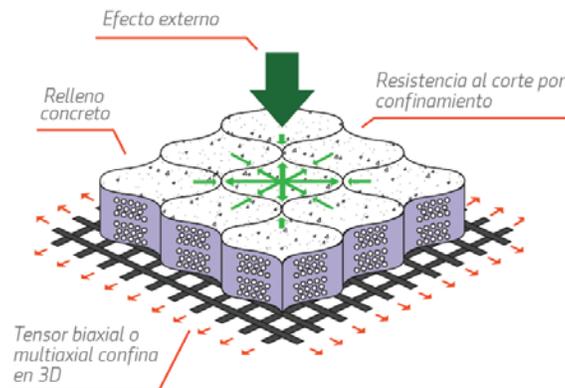


Figura 2. Mejora en el sistema de revestimiento de canales con empleo de tensores multiaxiales.



Figura 3. Canal con tensores multiaxiales, sin estacas.

Las obras de esta forma pueden tener aún mayor rendimiento y performance debido al confinamiento total del concreto.

## 2 EMPLEO DE CONCRETO LANZADO COMO ALTERNATIVA MODERNA PARA REVESTIMIENTOS DE CANALES CON GEOCELDAS

Las mayores limitantes encontradas a la fecha en la construcción de canales con geoceldas rellenas de concreto han sido dos:

- La posibilidad de colocar mayor cantidad de concreto por día.
- La posibilidad de colocar el concreto en paredes más verticales de los canales.

Ambos problemas han sido respondidos con el empleo del concreto lanzado que logra eliminar la limitante existente ante esta necesidad.

La Figura 4 muestra como la inclinación de pared de canal permite ser cubierta desde el concreto por gravedad hasta el concreto lanzado (shotcrete).

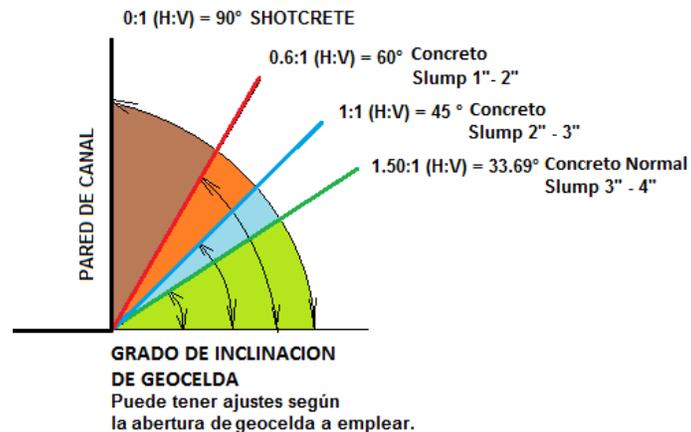


Figura 4. Alternativa de llenado de concreto en la pared inclinada del canal.

La aplicación de Geoceldas con Shotcrete viene siendo empleada desde hace seis años y se originó en aplicaciones de revestimiento de canales con geoceldas y concreto en el sector agrícola.

2.1 *Conceptos importantes sobre el shotcrete para el diseño con geoceldas.*

El concreto empleado para shotcrete posee resistencias típicas a la compresión superiores a 300 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días debido a altos contenidos de cemento. Esta resistencia puede llegar a ser más de 500 kg/cm<sup>2</sup> luego de un año.

La resistencia a la tracción puede estar entre 20 a 30 k/cm<sup>2</sup> a los 28 días.

La Figura 5 muestra una referencia del National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) de USA, sobre 36 especímenes ensayados para determinar valores típicos de resistencia a la compresión y tracción del concreto lanzado o shotcrete.

Se observa que aún para mayores días de curado el concreto alcanzará mayor resistencia.

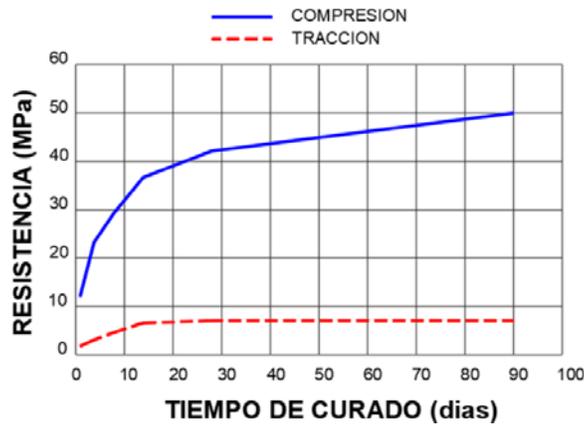


Figura 5. Resistencia a la compresión y a la tracción, típica de un concreto para shotcrete (NIOSH).

La adhesión del shotcrete es un tema de mucho interés en el dimensionamiento de canales con shotcrete. Este valor aparece inmediatamente cuando el concreto en lanzado contra la superficie de contacto. Y desde el día cero aporta una cantidad importante para la estabilidad del revestimiento durante el proceso constructivo.

La adhesión del shotcrete dependerá de parámetros importantes tales como:

- Limpieza del sustrato.
- Geología.
- Shotcrete (desde el mezclado hasta el esparcido).

En la Figura 6 se observa el valor medido de extracción para la adhesión, las líneas discontinuas muestran los extremos de valores medidos ante superficies de contacto lisas, ásperas y gruesas. El valor mostrado en línea continua es el promedio de los valores observados.

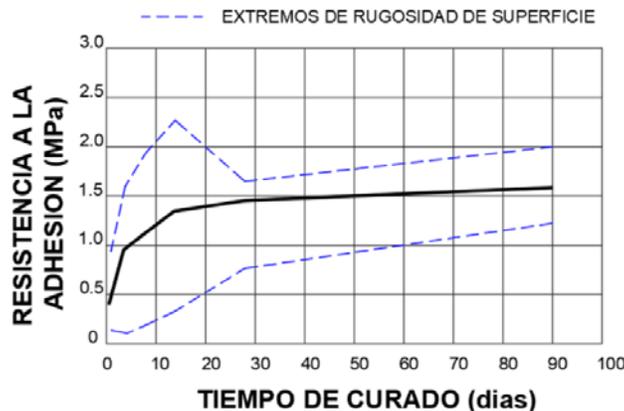


Figura 6. Resistencia a la Adhesión Promedio (NIOSH) entre 185 especímenes con distintas rugosidades de contacto.

La resistencia a la adhesión en USA fluctúa entre 0.69 MPa a 1 MPa (Malmgren 2001).

En Suecia (Malmgren 2001) la resistencia a la adhesión varía de:

- 0.50 MPa entre shotcrete y roca,
- 1.00 MPa entre capas de Shotcrete y
- 1.50 MPa en shotcrete aplicado para reparación de concreto.

En Minería subterránea el rango de resistencia a la adhesión varía entre 0.20 MPa a 1.50 MPa (Malmgren 2001).

El NIOSH concluye en sus revisiones que la resistencia a la adhesión varía en un rango entre 0.44 MPa a 1.58 MPa. (Figura 6).

*Tabla 1. Resistencias Mínimas de unión según ACI 506*

Tipo de unión	Resistencia Mín. a Concreto (MPa)	Resistencia Mín. a Roca (MPa)
No Estructural	0.50	0.10
Estructural	1.00	0.50

Aun así, no hay un método universal para el cálculo de la adhesión del shotcrete.

Se tiene también que la resistencia al corte del shotcrete será:

$$\tau_f = c + \sigma'_n \tan \emptyset \dots (1)$$

Donde:

- c : cohesión entre shotcrete y roca.
- $\sigma'_n$  : esfuerzo normal efectivo en capa de shotcrete.
- $\emptyset$  : Angulo de fricción entre shotcrete y roca.

*Tabla 2 . Relación entre resistencia al corte ó cohesión (fsh) y resistencia a la adhesión (fa) entre concreto nuevo/shotcrete y concreto.*

Descripción	Resistencia de Adhesión fa (valores promedio) MPa	Resistencia al Corte fsh (valores promedio) MPa	Ratio fsh/fa
Resistencia entre concreto nuevo y antiguo (Ensayado en Laboratorio) Silfwerbrand (1987)	1.70	3.67	2.16
Resistencia entre shotcrete nuevo y concreto antiguo (Ensayado en Laboratorio) Silfwerbrand (1988)	1.74	3.22	1.85
Resistencia entre concreto nuevo y antiguo (Ensayado en Campo) Magnusson (1987)	1.46	3.50	2.40

Al existir variedad de resultados de resistencia al corte entre roca y shotcrete, el ratio  $f_{sh}/f_a$  será considerado como el mostrado en la Tabla 2 y conservadoramente se estima como  $f_{sh}/f_a = 2$  para su empleo en los cálculos de estabilidad.

Adicionalmente la cohesión  $C$  de (1) se puede estimar en dos veces la resistencia a la adhesión disponible.

Así mismo el ángulo de fricción  $\phi$  de (1) se estima en  $30^\circ$  que es común entre dos capas de concreto (Betonghandboken 1997).

Habiendo definido los criterios que regulan la adhesión se puede desarrollar un procedimiento de cálculo con el que se puede determinar la estabilidad de un revestimiento con el sistema de geoceldas.

## 2.2 Revisión de estabilidad de revestimiento con geoceldas.

Como ejemplo, para un canal con un caudal de 20 m<sup>3</sup>/seg y una pendiente de 2% con una base de 5m con restricción de espacio para disponer de paredes con taludes, se requiere paredes con inclinación casi vertical (1 H : 10 V).

De la revisión geotécnica se observa los taludes son estables pero se requiere control de erosión del flujo en la superficie.

Al revisar el canal se nota que este tiene un flujo supercrítico con Número de Froude = 2.08 y una velocidad asociada de 6.43 m/s, con un tirante de agua de 1m.

Para esta condición se calcula una fuerza de corte hidráulica en la base de 26 kg/m<sup>2</sup> ó 0.26 kN/m<sup>2</sup>.

En la base se tiene una geocelda de 150mm de altura, al revisar la fuerza de corte versus la capacidad de fricción en la base esta se mantiene estable con un factor de  $FS=2.01$  Se revisa la velocidad admisible de una geocelda de  $h=150\text{mm}$  a una velocidad de 6.43 m/s y se considera aceptable ya que tolera velocidades mayores a 7m/s. Esta parte del canal será llenada por bombeo y gravedad.

Para el caso de las paredes se escoge una geocelda de altura 100mm para revisión.

Al ser la inclinación 1H:10V da un ángulo de  $84.3^\circ$ , la fuerza de desbalance de un metro cuadrado de este revestimiento será de 2.75 kN/m<sup>2</sup>.

La fuerza de fricción de 0.07 kN/m<sup>2</sup> es insuficiente dando un valor del  $FS=0.02$  indicando inestabilidad casi total.

Se incorpora el concepto de adhesión y cohesión para apoyar al escaso nivel de fricción que intenta estabilizar la fuerza desbalanceadora.

Para esta revisión se debe observar:

- Se necesita una geocelda para recibir el shotcrete y evitar el salpicado excesivo, así como afianzar en su posición a la mezcla recién lanzada para distintos tiempos, recién colocada, 1 día, 7 días, 28 días.
- Se necesita un tensor Multiaxial como el mostrado en la Figura 2 y 3 para sostener a la geoceldas y la fijación durante la instalación así como apoyar al efecto de llenado. El área del tensor reduce el área total disponible de contacto para el shotcrete. Eso está computado.

De todo lo revisado en el acápite 2.1, para un concreto de  $f'_c=30\text{MPa}$ , se tiene una resistencia a la tensión de 3 MPa.

La resistencia a la adhesión y la cohesión respectiva para varios momentos del curado se toman de la Figura 6 y se tabulan en la Tabla 3 para mostrar los nuevos factores de seguridad (FS) en los taludes y su evolución en el tiempo.

Tabla 3 . Evolución del Factor de Seguridad en Taludes del Canal con geoceldas y shotcrete en el tiempo.

TIEMPO	Fa (Adhesión)	fsh (Cohesión)	FS
0 días	0.1 Mpa	0.2 MPa	41
1 días	0.2 MPa	0.4 MPa	83
7 días	0.9 MPa	1.8 MPa	373
28 días	1.4 MPa	2.8 MPa	580

El Tensor Multiaxial se determina para el proceso constructivo y para el sostenimiento en la puesta en operación, para este caso se estima un tensor con  $T_u=25$  kN/m de PET revestido.

La abertura de la geocelda se determina en función a la tasa de flujo o pérdidas estimadas, para este caso con un tirante de 1m se estima una abertura de 416mmx374mm asociado a una altura de 100mm en el talud y 150mm en la base.

Las geoceldas serán de HDPE (Polietileno de Alta Densidad) y deberán seguir los lineamientos del Instituto de Geosintéticos de Estados Unidos (GSI) estándar GSI-GS-15 sobre Geoceldas de HDPE, que posee todas las características técnicas de propiedades mecánicas y de durabilidad ya estudiadas por décadas sobre geoceldas por esta institución.

Queda por complementar detalles como eliminación de subpresión y revisión de eventuales asentamientos diferenciales en caso de suelos expansivos de ser el caso.

### 2.3 Experiencias de aplicaciones de canales con geoceldas y shotcrete

Inicialmente los canales con geoceldas y shotcrete se emplearon en el sector agrícola, en la búsqueda de revestimientos de bajos costos y de gran rendimiento. La existencia de expertise de instaladores de shotcrete asociado a la facilidad y rapidez de la instalación de la geocelda permitieron dar solución al problema del alto costo que significa el revestimiento de este tipo de estructuras hidráulicas.

La necesidad de construir canales de gran volumen y en lugares de espacio reducido son el motivo ideal para este tipo de desarrollo tecnológico.

La migración de este tipo de soluciones a la minería fue cuestión de tiempo, en donde contratistas mineros normalmente disponen de todos los equipos y personal para realizar esta actividad.

La Figura 7 muestra este tipo de aplicaciones iniciales en donde el método permite aún mayores rendimientos y se pueden revestir paredes de cualquier grado de inclinación.



Figura 7. Canal agrícola de 15 m<sup>3</sup>/seg revestido con Geoceldas y Shocrete

La Fig. 8 muestra un canal minero revestido con geoceldas y shotcrete. Se puede notar la diferencia en el tipo de equipo empleado aumentando aún más la precisión y el rendimiento.



Figura 8. Canal minero de 70 m<sup>3</sup>/seg revestido con Geoceldas y Shotcrete

El desarrollo de esta solución ha permitido evolucionar las formas de la instalación de geoceldas en canales con las mejoras esperadas en costo y tiempo.

### 3 CONCLUSIONES

- El sistema de revestimiento clásico de geoceldas con estacas es muy limitado a la fecha y ya está pasando a la obsolescencia.
- Se han obtenido mejoras con el empleo de un tensor multiaxial debajo de la geocelda.
- La necesidad de un mayor rendimiento y cubrir inclinaciones verticales han sido resueltas satisfactoriamente con el empleo de geoceldas y shotcrete.
- Las metodologías de cálculo de este tipo de revestimientos dependen de la forma en que se desee aplicar el shotcrete en el terreno.

### REFERENCIAS

Malmgren L. (2001). "Shotcrete Rock Support Exposed to Varying Load Conditions", Tesis Lulea University of Technology, Suecia (2001)

H.-C. Kühne, B. Maier, M. Maultzsch, B. Meng, "Verification of the suitability of shotcrete on low strength concrete surfaces", 10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components, Lyon, France (2005)

ACI Commite 506 (1995) "Specification for shotcrete", American Concrete Institute (ACI), USA (1995)

B. Seymour, L. Martin, C Clark (et al.) (2008) "A Practical Method of Measuring Shotcrete Adhesion Strength", National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), Spokane, WA, USA (2008)

Silfwerbrand J. (1987) "Effekter av differenskrypning, krypning och fogytans egenskaper på bärförmågan hos samverkansplattor av gammal och pågjuten betong". Meddelande nr 147, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stocolmo, Suecia

Silfwerbrand J. (1988) "Lagning av betongskador med sprutbetong, Försök med balkar under statisk och utmattande last". Meddelande nr 153, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stocolmo, Suecia

Magnusson (1987). "Mätningar på järnvägsbro i Gnosjö, Småland, Sweden". Stencil, Department of Structural Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stocolmo, Suecia

Betonghandboken (1997) " Concrete Handbook, Material", Suecia

G. Fierro (2017) "Manual de Diseño de Canales con Geoceldas", Grupo TDM, Perú (2017)