

# SOSTENIMIENTO ACTIVO DE EXCAVACIONES MINERAS SUBTERRÁNEAS Y A CIELO ABIERTO MEDIANTE EL MORTERO DE RESINA EN PERNOS Y TENDONES DE ANCLAJE

Oswaldo Ortiz Sánchez\*, Francisco D. Fernández Cauti\*\*, Wilfredo Blas Guzmán\*

## RESUMEN

El perno o tendón de anclaje es un dispositivo de sostenimiento eficaz, de instalación simple y rápida y de menor costo que cualquiera de los métodos de sostenimiento conocidos. Existe una gran variedad de pernos y tendones para fijar la roca, que van desde los bulones de madera hasta los de tubo de fierro y varillas de acero liso y corrugado con anclajes que en general son de dos clases: puntual y longitudinal. El más difundido en el presente es el anclaje longitudinal, del cual el anclaje con lechada de cemento se usa más por su facilidad de aplicación y bajo costo. La lechada de cemento, no obstante, tiene deficiencias para su aplicación en anclaje debido a su baja resistencia a la tensión y corte, contracción volumétrica al fraguar, baja capacidad de adherencia, prolongado periodo de fraguado, baja resistencia a la corrosión, a la humedad, al intemperismo y a las vibraciones.

La alternativa es la resina, pero su elevado costo prácticamente ha eliminado su uso como anclaje de pernos y tendones especialmente en la industria minera. La solución que se plantea en este estudio es el empleo de un mortero de resina constituido por grava de cierta granulometría y resina expansiva en una proporción de 4 a 1, lo que permitiría el regreso de la resina como anclaje de pernos tanto en la minería subterránea como en la superficial y en otras innumerables aplicaciones de consolidación de terrenos en el campo de la ingeniería civil.

Las pruebas de laboratorio efectuadas muestran que el mortero de resina tiene mayores niveles de adherencia a la roca que la lechada de cemento. Adicionalmente, el fraguado es rápido, posee gran resistencia a la corrosión ácida o alcalina, soporta la humedad y altas vibraciones.

Para la aplicación de la grava se ha diseñado un inyector neumático cuya característica es usar el aire disponible de la operación minera o de cualquier compresor.

La instalación del perno o tendón tiene la siguiente secuencia: 1° perforación del taladro a la profundidad y diámetro requeridos, 2° instalación del perno o tendón, 3° inyección de la grava en los espacios vacíos del taladro, 4° inyección de la resina (dos componentes), mediante una bomba que trabaja a presiones variables hasta 200 bares, siendo ésta graduable de acuerdo con los requerimientos.

El sistema es aplicable en el techo, paredes o piso de la excavación y el tiempo de aplicación no es significativamente mayor que el empleado en la instalación de los otros tipos de pernos (5 a 7 minutos por perno).

**Palabras clave:** Mortero, resina, grava, perno, anclaje, inyector.

## ABSTRACT

The rock or cable bolt is an efficient and simple rock mass support; it takes few minutes to install and it is lower in cost than any of the known methods of rock support. Rock bolts are of many kinds running from the wooden bolt to the tube and corrugated steel bar. Fixing the bolt in place can be achieved by point or longitudinal anchoring the last one being more commonly used. In both underground and surface mining

\* Docentes EAP de Ingeniería de Minas FIGMMG

\*\* Egresado EAP Ingeniería de Minas FIGMMG, UNMSM.

including soil stabilization, the cement type longitudinal anchoring is more frequently applied due to its low cost and easy handling. Cement grout anchoring however has deficiencies due to its: a) low resistance to tension and shear, b) volumetric shrinking, c) low adherence capacity, d) long period of hardening, e) low resistance to corrosion and weathering, vibration and humidity.

Resin grouting was efficient for anchoring bolts in the past, however it is no longer used in mining due to its high cost. The alternative presented in this study is a gravel-resin mortar at a ratio of 4 gravel to one resin. Gravel sizes tested in the laboratory ranged from 2 to 6 mm. in diameter. The resin is a poliuretane with expansion properties which increases its volume from one to ten depending on the level of gravel humidity.

Physical properties of this material and some other characteristics such as resistance to corrosion, vibrations and period of hardening are much better than those of the cement grout. Gravel injection into the drill hole is achieved by a designed pneumatic injector which uses the installed air pressure and flow at site.

The rock bolt sequency installation is as follows: 1) drilling of the bolt hole at the required position, depth and diameter, 2) bolt fixing at the collar and installation of the injection tube, 3) gravel injection into the hole chamber, 4) resin injection into the gravel particles spaces.

Time taken for installation of each bolt is in the range of 5 to 7 minutes which is about the time used in installing the other systems of rock bolts.

**Key words:** Morter, resin, gravel, rock bolt, injector.

## I. INTRODUCCIÓN

En toda explotación minera, el sostenimiento de las labores es un trabajo adicional de alto costo que reduce la velocidad de avance y/o producción pero que a la vez es un proceso esencial para proteger de accidentes al personal y al equipo.

Existen varios métodos de refuerzo de la roca, pero de todos el tendón o perno es el más efectivo, rápido de instalar y de bajo costo. Se conocen varios sistemas de pernos y tendones de anclaje desarrollados a través de los años por grupos de investigación y empresas fabricantes para su aplicación en la estabilización de excavaciones subterráneas y superficiales. Estos van desde el bulón de madera hasta el tubo de fierro o acero y varilla de acero corrugado que pueden anclarse de dos formas diferentes: Puntual y longitudinal. Para los fines de este estudio, nos interesa el anclaje longitudinal, que también puede ser muy variado, pero mencionaremos solo a la lechada de cemento y a la resina epóxica, esta última muy eficiente en sostenimiento inmediato y donde existen aguas corrosivas y otras restricciones. Actualmente es escasa su aplicación en operaciones mineras por su elevado costo; en su reemplazo se emplea la lechada de cemento que es muy usada en anclaje longitudinal con resultados satisfactorios en ambientes secos, ausentes de aguas corrosivas, o donde no se generan vibraciones y no se requiere sostener el terreno con rapidez y en forma permanente.

## II. OBJETIVO

Desarrollar un anclaje longitudinal en pernos y tendones mediante el mortero de resina, cuyas características de sostenimiento sean superiores a las de la lechada de cemento.

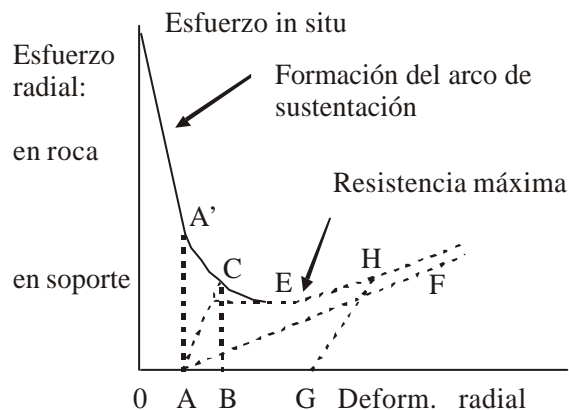
Diseñar y fabricar un inyector neumático de grava para el bombeo de la grava al recinto de anclaje donde se mezclará con la resina de dos componentes bombeada a presión. Simular el sistema para calibrar los inyectores de grava y resina y efectuar pruebas en el campo.

## III. JUSTIFICACIÓN

La estabilización de terrenos en operaciones mineras y en construcciones en general es una labor de gran importancia y necesidad, pero a la vez de alto costo, que ocupa parte del tiempo de labor pudiendo interferir con los avances. En la minería, el desprendimiento y caída de roca constituye el mayor causante de accidentes incapacitantes y fatales de acuerdo con las estadísticas. Se requiere por lo tanto métodos de sostenimiento rápidos, seguros y de bajo costo. Los pernos y tendones de anclaje cumplen estos requerimientos pero poseen limitaciones que deben analizarse para mejorarlos. Este estudio pretende contribuir con una alternativa de sostenimiento especialmente para terrenos difíciles con presencia de aguas corrosivas y otros factores limitantes, a costos competitivos y condiciones técnicas ventajosas en el uso de los diferentes tipos de pernos y tendones de anclaje.

### 3.1. Rapidez de sostenimiento

La Fig. N° 1 muestra el comportamiento de la roca al crearse una abertura en un macizo rocoso. El movimiento, antes de la instalación del soporte, está representado por el segmento OA. Si el sostenimiento fuera incompresible, la carga sobre el soporte sería la línea AA', pero todo sostenimiento se deforma y también las paredes de la excavación llegando a un punto de equilibrio en C con un desplazamiento radial OB y deformación AB del soporte a un nivel de carga CB. El equilibrio en C se obtiene solo si se aplica un sostenimiento apropiado y es colocado a tiempo. La línea AeE muestra el comportamiento de este soporte que cede antes de que la excavación se estabilice. La línea AF representa sostenimiento muy débil poco confiable y la línea GH corresponde a un sostenimiento muy tardío y por lo tanto ineficiente. Esto nos lleva a la conclusión de que el soporte debe ser instalado tan pronto como sea posible para que sostenga la deformación inicial de la roca al mismo tiempo que la masa rocosa genera su arco de sustentación. Adicionalmente, a menor competencia de la roca, más rápidamente debería instalarse el soporte para que el sostenimiento activo de la roca sea más efectivo y requiera menor capacidad de resistencia que un soporte pasivo. El soporte activo es de menor magnitud que el pasivo debido a que se utiliza la capacidad de autosostenimiento de la roca mientras que en el soporte pasivo se tiene todo el peso gravitacional de la roca. El perno de anclaje reúne las condiciones de soporte activo.



**Figura N.º 1.** Reacción del macizo rocoso al implantarse una excavación. Acción del sostenimiento instalado en diferentes periodos. (Deere D.U., et. al., 1970)

### IV. ELECCIÓN DE LA RESINA

Se conocen cuatro tipos de resinas que pueden usarse como adherentes: Metacrilatos, poliéster, epóxica y furánica. Las resinas poliéster y epóxica son las más usadas. El poliéster es inferior a la epóxica en resistencia, capacidad de adherencia y recubrimiento, pero su costo es inferior a esta y su resistencia es mayor que la de la mayoría de las rocas.

El poliéster es un líquido que se solidifica en contacto con un catalizador. Su resistencia se incrementa con el tiempo muy rápido al inicio y luego lento. En su masa contiene rellenos como cuarzo, plásticos, fibra de vidrio y asbesto en un 50 % de la mezcla total. Posee alta resistencia a la corrosión de ácidos, álcalis y otros; tiene baja contracción volumétrica, alta resistencia a la compresión, vibraciones y cargas repetidas. Las resinas poliuretanos de uno y dos componentes que son de la familia poliéster, poseen propiedades similares a las descritas anteriormente y algunas son de características expansivas y de alto poder de fijación, y son apropiadas en consolidación e inyección de suelos y excavaciones.

Considerando el sistema de aplicación de los elementos del mortero en el taladro donde primero se inyecta la grava y luego la resina, y la facilidad de las pruebas en el laboratorio sin usar presión significativa de inyección, se decidió experimentar con la resina expansiva poliuretano de dos componentes. Esta resina, cuya marca comercial es CarboPur WFA, tiene alto poder de penetración y baja viscosidad que permite rellenar fisuras y espacios pequeños con gran facilidad. En contacto con la humedad de la roca, la resina CarboPur WFA se expande de 2 a 10 veces su volumen inicial, propiedad muy importante para automezclarse con la grava. Adicionalmente, esta resina tiene características superiores a las de la lechada de cemento haciéndolo muy atractiva para fijar pernos y tendones en taladros perforados en roca.

### V. METODOLOGÍA

El desarrollo del mortero de resina se inició con las pruebas de laboratorio para determinar las características físicas de este tipo de anclaje. Adicionalmente, se efectuó un estudio microscópico para determinar el grado de penetración de la resina en los granos de grava y estimar el nivel de consumo de resina de los diferentes tipos de roca. Esta propiedad fue detectada al efectuar las pue-

bas de adherencia de la resina en varios tipos de roca y es importante para minimizar el uso de la resina al elegir el tipo de grava de la mezcla. La grava que se utilizó en las pruebas fue una andesita de grano fino caracterizada por su baja absorción de resina.

### 5.1. Pruebas de laboratorio

Las pruebas macroscópicas de laboratorio efectuadas son: Compresión uniaxial, tensión indirecta, corte y adherencia tanto para la lechada de cemento como para el mortero de resina. Las pruebas en lechada de cemento tuvieron como objetivo servir de patrón de comparación en razón de que el anclaje de cemento es ampliamente usado en la mayoría de las operaciones mineras. Las frecuencias de estas pruebas fueron de 2 días durante la primera semana y de 4 a 6 días hasta completar los 28 días de consolidación del cemento. Se ejecutaron 84 pruebas en lechada de cemento y 20 pruebas en mortero de resina. El resumen de los resultados de estas pruebas se muestra en la tabla N.º 1.

#### 5.1.1. Preparación de muestras

Las muestras para las pruebas se prepararon en probetas metálicas cilíndricas desarmables de 10 cm de diámetro interior y 20 cm de altura para la lechada de cemento y el mortero de resina. Adicionalmente se prepararon muestras prismáticas de 4 x 4 x 16 cm en moldes metálicos desarmables. Las pruebas de adherencia requirieron perforaciones de varios diámetros en muestras de rocas. Se obtuvieron muestras perforadas de 11 a 16 cm de alto y diámetros entre 1-3/4 a 3 pulg.

#### 5.1.2. Lechada de cemento

La lechada de cemento para las pruebas se preparó en un mezclador de cemento y agua en la proporción de 19 litros de agua por bolsa de cemento Portland ASTM tipo 1 «El Sol» de 42.5 kg. Se obtuvo una mezcla homogénea con la que se moldearon las probetas y prismas para las pruebas a intervalos de 2 a 6 días hasta los 28 días de fraguado.

#### 5.1.3. Mortero de resina

Para las muestras de mortero de resina se preparó grava de roca de alta dureza de 3 tama-

ños: 2, 4 y 6 mm de diámetro. El costo de esta grava preparada en el laboratorio es elevado, por lo que se optó por adquirir roca chancada bulk y luego separarlos por tamaños con mallas adquiridas de los tamaños requeridos. Después de observar el comportamiento del sistema, se decidió trabajar con grava de granulometría entre 4 y 6 mm en razón de que la inyección de la resina en las muestras no se hacía a presión. La resina escogida fue el poliuretano CarboPur WFA de dos componentes de fraguado rápido (3 minutos), con endurecimiento total en 2 horas. La mezcla de los dos componentes en presencia de humedad produce una espuma consistente que aumenta su volumen inicial entre 2 a 10 veces dependiendo del porcentaje de humedad.

### 5.2. Pruebas físicas

Las muestras preparadas en ambos casos, lechada de cemento y mortero de resina, se probaron por compresión simple, tensión indirecta, corte y adherencia. Dos pruebas adicionales programadas: contracción volumétrica y tiempo de fraguado, no fueron efectuadas en razón de que para el mortero de resina no se consideró de importancia y en la lechada de cemento fue posible evaluarlos cualitativamente al ejecutar las otras pruebas.

Los niveles de resina que se probaron fueron 15, 20, 25 y 30 por ciento del volumen total requerido en los 3 tipos de muestra: Probetas, prismas y perforaciones en roca.

Las muestras se prepararon llenando primero los moldes con grava hasta el volumen calculado para cada tipo de probeta. Previamente, la grava fue humedecida con agua para aprovechar la propiedad expansiva de la resina. Para tal efecto, las muestras fueron confinadas en ambos extremos para tener un ambiente cautivo permitiendo que la resina penetre en todos los vacíos dejados por la grava. El aire desplazado de los espacios entre partículas de grava, fue expulsado al exterior por la resina a través de pequeñas aberturas dejadas en el extremo superior del molde.

#### 5.2.1. Compresión

Las pruebas de compresión uniaxial se ejecutaron en una prensa Tinius Olsen de 100 000 kg de capacidad.

Las probetas de lechada de cemento se probaron a intervalos de 2 a 6 días con el objeto de

evaluar los cambios de resistencia en relación con el tiempo de fraguado en un periodo de 28 días. Se obtuvo un incremento apreciable de la resistencia desde 110 kg/cm<sup>2</sup> hasta 250 kg/cm<sup>2</sup> entre el primer y el octavo día de fraguado. En el intervalo de 9 a 28 días se registró gran dispersión de datos alcanzando un valor medio de 270 kg/cm<sup>2</sup>.

Las pruebas de compresión requieren acondicionamiento de la muestra para que la carga sea aplicada uniformemente, para lo cual en los extremos circulares de la probeta se pegó una lámina de una mezcla de azufre y bentonita a 60 °C. Esta capa corrige irregularidades y le da horizontalidad a las bases para asegurar una prueba de compresión confiable. El equipo Tinius aplica carga a un ritmo ascendente de 12 kg/seg.

Las pruebas de compresión en las muestras de mortero de resina siguen los mismos lineamientos que para la lechada de cemento. La tabla N.º 1 presenta los promedios de las resistencias a la compresión simple de las probetas de lechada de cemento y mortero de resina.

Los esfuerzos calculados para las probetas de lechada de cemento varían con el tiempo de fraguado desde un promedio de 10 kg/cm<sup>2</sup> en el primer día de fraguado hasta 22 kg/cm<sup>2</sup> como máximo en el día 28 de fraguado.

### 5.2.3. Corte

En la prueba de corte se requirió un aditamento especial de acero que se fabricó y acopló a la prensa Amsler de 100 000 kg de capacidad para simular el corte en materiales masivos como la lechada de cemento y el mortero de resina. Las probetas para la prueba son prismas rectangulares de 4 x 4 x 16 cm que calzan exactamente en el aditamento de acero. El corte se genera en un plano vertical transversal al eje de la muestra aplicando la carga ascendente a un ritmo de 12 Kg/cm<sup>2</sup>. En la lechada de cemento la resistencia al corte es errática y se inició con 33 kg/cm<sup>2</sup> alcanzando 49 kg/cm<sup>2</sup> en el día 8 de fraguado. Entre los días 9 y 28 se produce gran dispersión estableciendo una media de 40 kg/cm. Las pruebas de

**Tabla N.º 1.** Resumen de resultados de las pruebas de laboratorio con lechada de cemento y mortero de resina\*

Tipo de anclaje	Tiempo de Fraguado (días)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )			
		Compresión * uniaxial	Tensión* indirecta	Corte**	Adherencia***
Lechada de cemento	2	149.50	25.74	57.00	9.20
	5	228.60	15.77	32.50	-
	8	250.00	16.20	49.60	9.30
	Aprox. constante	262.00	16.50	49.50	10.00
Mortero de resina	5 min.	140.00	24.50	35.00	24.00

\* Compresión y tensión en probetas cilíndricas. \*\* Corte en probetas prismáticas rectangulares, \*\*\* Perforaciones en muestras de rocas y probetas cilíndricas de lechada de cemento.

### 5.2.2. Tensión

Para las pruebas de tensión se aplicó el método indirecto brasilero, para lo cual las probetas colocadas horizontalmente se sometieron a compresión perpendicularmente a sus ejes longitudinales. El cálculo de la tensión se obtuvo por la expresión:  $\sigma = 2 \cdot T / (p \times D \times h)$  donde T es la fuerza de compresión aplicada por el equipo Tinius; D y h son el diámetro y altura de la probeta, respectivamente. La velocidad de aplicación de la carga fue de 11.5 kg/seg.

corte en prismas rectangulares de mortero de resina tienen una mínima de 25 kg/cm<sup>2</sup> y una máxima de 34 kg/cm<sup>2</sup>.

### 5.2.4. Capacidad de adherencia

La adherencia de la lechada de cemento se probó en muestras de roca con perforaciones de 3 pulgadas de diámetro y para el mortero de resina en muestras de varios tipos de roca con perforaciones entre 1-3/4 a 3 pulgadas de diámetro.

Las perforaciones en las muestras fueron rellenas con lechada de cemento o mortero de resina fijando además una varilla metálica de 2 pies de largo en el eje central con el objeto de facilitar las pruebas en el equipo Tokyokoki Seizosho cuya capacidad de tensión/compresión es de 50 000 kg. En estas pruebas se midió la adherencia en la interfase roca-lechada de cemento y roca-mortero de resina. Para la lechada de cemento se calculó una media de 8.00 kg/cm<sup>2</sup> y para el mortero de resina 24.00 kg/cm<sup>2</sup>.

La baja adherencia de la lechada de cemento a la roca podría reducirse aún más si esta contiene humedad o hay generación de ácidos o álcalis o si la masa rocosa se encuentra sometida a vibraciones.

### 5.3 Optimización del mortero de resina

El mortero de resina puede optimizarse mediante el análisis de sus componentes básicos: grava y resina. La grava tiene como variables principales la granulometría, porosidad de roca, dureza y nivel de humedad. En la resina expansiva influyen la densidad, fluidez y humedad.

#### 5.3.1 Grava

Es el componente básico del mortero y debe seleccionarse tomando en cuenta su granulometría, alta dureza, baja porosidad y contenido de humedad. El tamaño de grano varía en relación directa con la velocidad de recubrimiento de las partículas de la masa de grava, porcentaje de humedad y tipo de roca de la grava y de las paredes del taladro. Otras variables son el confinamiento del recinto del taladro y la presión de inyección de la resina. Se estima, de acuerdo con las observaciones en las pruebas, que el tamaño de grava debe estar entre 2 a 6 mm de diámetro. El tipo de roca de la grava y de las paredes del taladro tiene influencia en el consumo de resina. A mayor porosidad de la grava y de las paredes del taladro, mayor consumo de resina. La grava debe prepararse, por lo tanto, de roca masiva de alta dureza para evitar alta absorción de resina. La proporción grava/resina en el mortero es superior a 3/1, lo que permite disminuir costos.

### 5.4 Inyectores de grava y resina

El equipo inyector de grava transporta a presión neumática la grava con cierta humedad hasta

el fondo del taladro para pernos instalados hacia arriba y hasta el collar del taladro para pernos instalados hacia abajo. La presión de inyección es graduable y depende de la densidad de la grava, altura de inyección, flujo de la grava (tiempo de inyección) y orientación del taladro (arriba o abajo).

#### 5.4.1 Inyector de grava

Este equipo consta de tolva de alimentación, mezclador de grava y aire, accesorios. Se diseñó dos tipos de tolva: una abierta a presión atmosférica y la otra herméticamente sellada para recibir una presión graduable sobre la superficie libre de la masa de grava que permite empujar la grava dentro del flujo de aire a presión.

##### 5.4.1.1 Parámetros

El sistema integral consta de: a) elemento motor dado por el aire a presión, b) dispositivo mezclador de aire-grava y c) tubo de salida o de alimentación de grava. El elemento motor es el aire a presión que es tomado del sistema de aire comprimido de la operación minera o de un compresor portátil. El volumen de aire suministrado generalmente es de 4 a 5 m<sup>3</sup>/min a presiones que varían entre 2 y 6 bares. La tubería auxiliar de aire a presión es de 1 pulg. de diámetro y llega al equipo a través de un tubo flexible de alta presión que permite mover el cargador a un punto cercano al taladro que se requiere inyectar. La tolva cilindro-cónica del mezclador recibe la carga de grava manualmente y alimenta una cantidad constante de grava calculada para cada taladro de acuerdo con su diámetro, longitud y diámetro del perno. La grava se mezcla con el aire y viaja hasta el collar del taladro por medio de un tubo de 3/4 de pulg. de diámetro y desde aquí a través de un tubo de 3/8 de pulg. de diámetro hasta el punto de entrega en el taladro. La grava llena el recinto vacío del taladro y el tubo de alimentación queda en posición para inyectar la resina. La longitud de la tubería de alimentación de grava debe ser reducida al máximo para mantener la caída de presión siempre menor que la presión disponible, lo que se consigue acercando el mezclador al collar del taladro.

#### 5.4.2 Inyector de resina

El inyector de resina es una bomba que puede entregar 200 bares. Impulsa la resina hasta el

fondo del taladro a través del mismo tubo de inyección de la grava.

El equipo de bombeo de resina es de diseño especializado con las siguientes características: Fabricante: CarboTech, Berg-und Tunnelbausysteme GMBH, Alemania, sistema neumático, 2 a 6 bares de presión de propulsión y 200 bares de presión de elevación, caudal de aire consumido 4.5 m<sup>3</sup>/min., caudal de la bomba 0.30 - 2.50 litros/min., peso 28 kg. El equipo posee tubos flexibles de aspiración, enjuague e inyección y adaptador de conexión.

#### 5.4.3 Simulación de inyección

Estas pruebas permitieron estimar la velocidad y tiempo de penetración de la resina en una columna de grava de 1 metro de altura en tubos de plástico de agua de 1-1/2 pulg. de diámetro. Las pruebas se efectuaron a 2 niveles de presiones de inyección: 3 y 5 bares para 2 tamaños de grava: 4 y 6 mm. Los tubos que simulan taladros confirmaron la facilidad del movimiento de la resina en la masa de grava estableciendo la presión de inyección apropiada, el tiempo de viaje de la resina y el tamaño de grava. La tabla N.º 2 presenta los resultados de estas pruebas.

taladro, el cual debe tener un diámetro de 38 mm o más dependiendo del lugar de aplicación del mortero. Los cálculos nos muestran que el diámetro del taladro no debe ser superior a 2-1/2 pulg. en aplicaciones de superficie, en razón de que a mayor diámetro el costo de la resina se incrementa rápidamente.

Para un perno de 3/4 de pulg. de diámetro, 2.50 m. de largo, instalado en un taladro de 38 mm de diámetro el desglose del costo es el siguiente:

Perno de anclaje	S/. 13.00
Platina y otros	6.00
Tubo de inyección de 3/8 pulg. diámetro	3.00
Grava 2 kg.	1.50
Resina al 25% de volumen de grava	22.00
Mano de obra	2.00
Otros	3.50
Equipo inyector de resina	8.00
Total	S/. 59.00
	US \$ 16.95

**Tabla N.º 2.** Simulación de inyección de grava y resina en tubo de plástico de agua de 1-1/2 pulg. de día., un metro de longitud a dos presiones y dos tamaños de partícula\*

Presión (bares)	Tamaño de Partícula (mm)	Velocidad de Inyección (kg/min)		Tiempo (seg.)	
		Grava	Resina	Grava	Resina
3	4	4.1	4.9	25	6.0
	6	3.9	5.0	26	5.5
5	4	3.8	5.5	27	5.0
	6	4.2	6.0	24	4.5

\* Grava 1140 cm<sup>3</sup> o 1.71 kg. Resina 285 cm<sup>3</sup> ó 0.456 kg.

#### 5.5 Costos del sistema

Los elementos que intervienen en el cálculo de costos son: Resina, mano de obra, grava, perno. Este estimado no incluye la perforación del

#### VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con las pruebas de laboratorio efectuadas tanto con la lechada de cemento como con el mortero de resina, las resistencias a la com-

presión y tensión de estos dos materiales son aproximadamente similares pero las resistencias de corte y adherencia del mortero de resina son superiores a las de la lechada de cemento.

Se encontró que la mejor mezcla resina/grava está en la proporción 1 a 4. Esta relación, sin embargo, podría cambiar requiriendo más resina si debido a la presión la resina es forzada a penetrar en las fisuras de las paredes laterales del taladro si estas se encontraran fracturadas. Adicionalmente, puede usarse una amplia gama de tamaños de grava de roca pero es recomendable fijarlo en el rango de 2 a 6 mm de diámetro. Esto, además, influirá en el buen rendimiento del inyector de grava. Se ha encontrado que la resina es más efectiva en adherencia en los espacios más pequeños que limitan roca-perno o roca-roca.

La grava que se experimentó fue la andesita de grano fino de alta dureza que se encuentra en abundancia en la mayoría de las operaciones mineras del país.

Además de la adherencia, las siguientes propiedades del mortero de resina son superiores a las de la lechada de cemento: resistencia a la corrosión ácida o alcalina, resistencia a las vibraciones, rapidez de fraguado, mínima contracción volumétrica, baja densidad y mayor fluidez, que permite eficiente penetración en los espacios más pequeños entre partículas de grava. La resina se consolida mejor en los espacios pequeños de la roca o grava.

Con el objeto de facilitar la aplicación de la grava y de los componentes de la resina en el taladro, es factible el desarrollo de un inyector integral de grava y resina para permitir simplificar la operación de instalación del perno.



**Inyector neumático de resina.**

## VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Atlas Copco, 1990. *Sostenimiento Instantáneo de Roca*, Impreso, Suecia.
2. Atlas Copco, 1992. *Aire Comprimido y sus Aplicaciones en la Industria*. Charlas, Atlas Copco S.A., Lima.
3. Brij Nigam, 1989. *Pneumatic Conveyance*, Atlas Copco S.A.
4. Carbotech, Berg-und Tunnelbausysteme GMBH. 2002. *Materiales de construcción para inyección*.
5. Carbotech., *Aplicaciones y equipamiento*, 9p., Impresos, Lima.
6. Celtite Inc., 1990. *Rock bolting, high speed anchoring and grouting systems for roof and rock bolts*. Technical Service Depto. Celtite Inc, 14p., Cleveland, Ohio.
7. Deere D.U., et. al., 1970. "Design of tunnel support systems". *Highway Research Record*, N° 339, pp. 26-33.
8. Ingemmet-Armco Peruana S.A., 1990. *Comportamiento de los pernos T.S.R. Armco*, Informe técnico 01-90/DMR Instituto geológico, minero y metalúrgico, Lima.
9. Moore R. and Noyons E., 1999. "Ground control techniques. Current practice and future trends in deep Gold mines", *World mining equipment*, pp. 22 – 24.
10. Obert, L. and Duval, I. W., 1967. *Rock mechanics and design of structures in rock*, pp. 612-634. John Wiley & Sons, Inc, New York, N.Y.
11. Sika, 2001. *Sikadur 31 HI-MOD-GEL*, Impreso, Sika Perú S.A., Lima.



**Inyector neumático de grava mostrando manguera, tubo de grava y tapón de madera.**





Muestras de roca falladas en la prueba de adherencia con mortero. Riolita (derecha), andesita (izquierda)



Fallamiento de la lechada de cemento vaciado en taladro de muestra de roca. Prueba de adherencia.



Sección pulida 50X. Mortero de resina



Inyección de resina en grava contenida en molde cilíndrico metálico



Moldes metálicos llenos de grava



Probetas de lechada de cemento falladas en tensión