

Capacidad de anclaje de los pernos de roca Hydrabolt en función del diámetro de taladro

Capacity of anchor of Hydrabolt rock bolts according to bore hole diameter

Emiliano M. Giraldo P.¹

RECIBIDO: 24/06/2016 - APROBADO: 04/08/2016

RESUMEN

El sostenimiento de macizos rocosos con pernos de roca es en la actualidad de mayor aplicación en la industria de la excavación, razón por la cual es meritorio realizar estudios que atañen a este método de sostenimiento. Entre otros aspectos, existen parámetros que influyen directamente en la capacidad de anclaje de los pernos de roca, entre ellos el tipo de roca (variable incontrolable) y variables que el hombre puede controlar, dentro de estas se encuentra el diámetro de taladro, que a pesar de su gran influencia, poco se ha estudiado al respecto. El presente estudio se ha realizado para determinar la capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt, en función de la longitud efectiva de anclaje y el diámetro de taladro donde se instalan. Para tal propósito, se acondicionaron el sitio y la estructura necesaria para realizar las pruebas, simulando los taladros con tubos de acero de 33, 36, 38 y 40 mm de diámetro haciendo longitudes efectivas de anclaje de 1, 2, 3 y 4 pies. Las 64 pruebas se llevaron a cabo en el campus de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Los resultados del estudio demuestran que el diámetro óptimo de los taladros donde se deben instalar los pernos Hydrabolt es 38 mm, para cualquier longitud efectiva de anclaje.

Palabras clave: Sostenimiento de roca, pernos de roca, longitud efectiva de anclaje, capacidad de anclaje, perno de roca inflable, Hydrabolt.

ABSTRACT

Rock mass support with rockbolts, is the greater application method in the rock excavation industry, because is necessary to carry out studies concerning this method of support. Among other things, there are parameters that directly influence on the anchor capacity of rockbolts, including incontrolable variables by man such as rock type, and variables that the man can control, like the bore hole diameter, which despite its great influence, little has been studied in this respect. The present study was conducted to determine the anchor capacity of Hydrabolt rockbolts, depending on the bond length and the bore hole diameter where they are installed. For that purpose, were conditioned to the site and the structure necessary to perform tests, simulating holes with tubes of 33, 36, 38 and 40 mm diameter making bond lengths of 1, 2, 3 and 4 feet. 64 tests were performed in San Marcos university (Lima - Peru). The results of the study show that the optimal diameter of bore holes where the Hydrabolt bolts should be installed is 38 mm, for any bond length.

Keywords: Rock support, rock bolts, bond length, anchor capacity, inflatable rock bolts, Hydrabolt.

¹ Docente de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM). E-mail: mgiraldo@unmsm.com.pe.

I. INTRODUCCIÓN

El sostenimiento de macizos rocosos en toda actividad de excavación es primordial, tanto para garantizar la integridad física y la salubridad del personal, así como para evitar daños a los equipos, las maquinarias y al medio ambiente, además de una adecuada productividad, que en suma se traducen en problemas económicos, sociales y empresariales. Dentro de este contexto, no basta únicamente seleccionar y dimensionar el elemento de sostenimiento más apropiado, sino también las condiciones en que se aplican (Atlas Copco, 2003).

Los elementos de sostenimiento más usados actualmente son los pernos de roca, en combinación o no, con otros elementos como morteros. Dentro de ello, los que vienen ganando bastante espacio son los pernos inflables, por su inmediata actuación y por configurar un arco de sostenimiento en el entorno de la excavación. Por estas consideraciones, el presente trabajo de investigación está enfocado en el estudio de la capacidad de anclaje de los pernos de roca inflables, tomando como modelo a los pernos Hydrabolt, bajo dos condiciones fundamentales de aplicación: longitud efectiva de anclaje (Bond Length) y el diámetro de taladros donde se instalan (Giraldo, 2012).

Para materializar lo antes planteado, primero se tuvo que analizar, diseñar y construir las estructuras donde se llevarían a cabo los ensayos, entre ellos, el sitio y la mesa para realizar las pruebas de arranque (pull test). Asimismo, para simular taladros de diferentes diámetros (imposibles de contar en una operación real), se ideó hacerlos en tubos de acero cuyos diámetros interiores sean los más próximos a los nominales utilizados en una operación de excavación, denominados, para los efectos del presente estudio, tubos simuladores.

Una vez seleccionados los tubos simuladores de 33, 36, 38 y 40 mm de diámetro interior y establecidas las longitudes efectivas de anclaje de 1, 2, 3 y 4 pies, a fin de tener una adecuada base de datos, se estableció que se realizarían 4 ensayos por cada diámetro y longitud, totalizando 64 pruebas. Las pruebas se llevaron a cabo en la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Los datos concernientes a la capacidad de anclaje fueron registrados durante las pruebas de arranque (pull test). Todos los datos se registraron en formatos adecuadamente diseñados, que luego fueron procesados en hoja de cálculo Excel, cuyos resultados indican que la capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt tiene un comportamiento uniforme y ascendente para 4 y 2 pies de longitud de anclaje, mostrando su mejor actuación en tubos de 38 mm. En general, los pernos Hydrabolt muestran su mejor capacidad de anclaje en tubos de 38 mm, para cualquier longitud efectiva de anclaje

I.1. Generalidades

El presente estudio es eminentemente experimental; como tal, demanda una serie de requerimientos difíciles de cubrir en una operación real, desde la disponibilidad de

área de pruebas hasta las facilidades de equipo, personal, servicios, entre otros; sobre todo por la cantidad de pruebas a desarrollarse. Para superar dichos inconvenientes, se ha ideado simular los taladros en roca utilizando tubos de acero, denominándolos “tubos simuladores”. El uso de tubos simuladores tiene una serie de ventajas sobre los taladros perforados en roca, puesto que posibilita ensayar los pernos bajo las mismas condiciones de diámetro y tipo de roca.

Análogamente, para el caso de los pernos inflables como los Hydrabolt, es pertinente el empleo de otro tubo que impida la expansión de la parte que no hará anclaje, al que, para los efectos del presente estudio, se le ha denominado “tubo de estrangulamiento”, cuyo diámetro interior es ligeramente superior al diámetro del perno inflable y el diámetro exterior, inferior al del tubo simulador.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Características de los pernos Hydrabolt utilizados

Para los efectos del presente estudio, se han utilizado los pernos inflables Hydrabolt, generosamente donados por la Cía. New Concept Mining. Estos pernos han sido fabricados a partir de un tubo original de aproximadamente 41 mm de diámetro exterior, que, luego de ser aplanados en su longitud, han sido plegados adoptando una sección transversal en forma de una “C” de doble pared. Este proceso se realiza para reducir su diámetro, a fin de que posibilite su introducción en los taladros, para que al inflarlos con agua a alta presión (25 MPa) trate de recobrar su diámetro original y se acople en las paredes de los taladros donde se instalan (New Concept Mining, [En línea] URL). Entre otras características, se pueden citar:

Diámetro promedio antes del inflado:
28.43 mm (nominal 29 mm).

Diámetro promedio después del inflado al aire libre:
42.5 mm.

Espesor de la pared del perno:
2 mm.

Longitud de perno utilizado:
6 pies (1,80 m).

2.2. Características de los tubos simuladores y de estrangulamiento utilizados para los ensayos

Las características de los tubos utilizados se sintetiza en la Tabla N° 1, donde se advierte que los diámetros internos de los tubos están próximos a los nominales. Es decir, para simular taladros de 36 mm se han usado tubos LAC (laminado al caliente de 36,56 mm de diámetro interior) y para los de 33, 38 y 40 mm se han empleado tubos cédula 80, 80 y 40, respectivamente, cuyos diámetros interiores son: 32,5, 38,53 y 40,96 mm en orden anterior. Todos los tubos de estrangulamiento fueron LAC de 30 mm (nominal).

Tabla N° 1. Características de los tubos simuladores y de estrangulamiento

Tipo de tubo	Tubo simulador				Tubo de estrangulamiento (LAC 30 mm)	
	33 mm (Sch. 80)	36 mm (LAC)	38 mm (Sch. 80)	40 mm (Sch. 40)		
Diámetro (mm)	Interno	32.5	36.56	38.53	40.96	29.74
	Externo	42.2	42.58	48.48	48.42	34.12
Espesor de la pared (mm)		4.85	3.01	4.975	3.73	2.19

2.3. Número de muestras

Para establecer adecuadamente el comportamiento de la capacidad de anclaje de los pernos de roca Hydrabolt en función del diámetro de taladro y considerando los costos involucrados, el diámetro del perno y su máximo diámetro de expansión, es posible hacer los ensayos en diámetros comprendidos entre 30 y 41 mm. Por estas restricciones se seleccionaron diámetros de los tubos simuladores de 33, 36, 38 y 40 mm. Asimismo, por cada diámetro se hicieron ensayos en 4 longitudes efectivas de anclaje (bond length) de 1, 2, 3 y 4 pies (0,30; 0,60; 0,90 y 1,20 m); y por cada combinación de diámetro y longitud efectiva de anclaje, se hicieron 4 pruebas, totalizando 64 pruebas (muestras).

2.4. Lugar de pruebas

Todos los trabajos concernientes a la construcción de la estructura para las pruebas, el corte de tuberías, la construcción de arandelas y soldadura se llevaron a cabo en un taller metalmeccánico. El montaje de los tubos simuladores y de estrangulamiento y el inflado de los pernos se llevaron a cabo en la planta de New Concept Mining en la ciudad de Lima. Las pruebas de arranque (pull test) propiamente se llevaron a cabo en la sede de la Escuela Académico de Ingeniería de Minas, dentro del campus de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, en la infraestructura construida para este fin, sobre el cual se detalla en el siguiente capítulo.

2.5. Metodología del estudio

- Acopio de la información referente a los pernos de roca inflables Hydrabolt.
- Diseños de estructura para las pruebas, sitio (Pozo y losa de concreto).
- Planificación de las pruebas.
- Perforación de pozo, entubado y construcción de losa de concreto.
- Trabajos metalmeccánicos: Traslado de pernos y tubos al taller, corte de tubos, fabricación de arandelas y trabajos de soldadura.
- Trabajos de entubado e inflado de los pernos: Traslado de tubos y pernos del taller metalmeccánico a la planta de NCM, entubado, codificación e inflado de los pernos.
- Pruebas de arranque: Traslado de pernos y equipo de arranque de la planta de NCM a la Escuela de

Ingeniería de Minas, clasificación de los pernos, ejecución de las pruebas de arranque, registro de datos (carga y elongación).

- Compilación y procesamiento de datos de las pruebas de arranque: Verificación del estado de las válvulas y la presión interior en los pernos Hydrabolt, compilación de la información y procesamiento de datos aplicando el factor de corrección según la certificación de calibración de Universidad Nacional de Ingeniería al manómetro utilizado, determinación de cargas pico y la elongación de los pernos.
- Análisis de resultados de las pruebas de arranque: Análisis de cargas en función de la longitud efectiva de anclaje y el diámetro de tubo utilizado.
- Análisis del acoplamiento de los pernos en los tubos: Traslado de pernos al taller metalmeccánico, seccionamiento de pernos y pulido de cortes, análisis del acoplamiento, ubicación y dimensionamiento de aberturas, cálculo de las superficies de contacto y aberturas.
- Discusión de resultados: Capacidad de anclaje de los pernos en función de la longitud efectiva de anclaje y diámetro de los tubos. Área efectiva de anclaje de los pernos, posición de las aberturas y análisis comparativo de las superficies de contacto y aberturas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES



Figura N° 1. Equipo de arranque instalado.

3.1. Resultados

El equipo de arranque detallado en el capítulo I, cuyo montaje sobre la mesa de pruebas se ilustra en la Figura

Nº 1, se utilizó para realizar las 64 pruebas. Según el informe de calibración reportado por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), respecto al manómetro del equipo, establece la siguiente ecuación juste: $Y = 0,9516 x$; donde: Y es la lectura patrón (UNI) y x es la lectura en el manómetro, registrado durante las pruebas.

Todas las pruebas de arranque (pull test) se llevaron a cabo sobre la losa construida en la sede de la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Durante estas pruebas básicamente se registró la carga incremental aplicada, hasta una carga pico, a partir de la cual no seguía ascendiendo la carga. También se suspendía la prueba por fallo o ruptura en la cabeza del perno Hydrabolt, como ilustra la Figura Nº 3.

3.1.1. Resultados de los ensayos en tubos de 33 mm

Todas las pruebas se llevaron a cabo sin situaciones que destacar. La Figura Nº 2 ilustra los resultados de la carga aplicada en función de la longitud efectiva de anclaje. Las cargas pico ajustadas, según la ecuación arriba indicada, resultaron 9.52 ton para 1 pie y 13.32 ton para 4 pies, como la mínima y la máxima carga mostrada por el perno en este diámetro. La curva graficada obedece a una ecuación cuadrática con alto coeficiente de correlación.

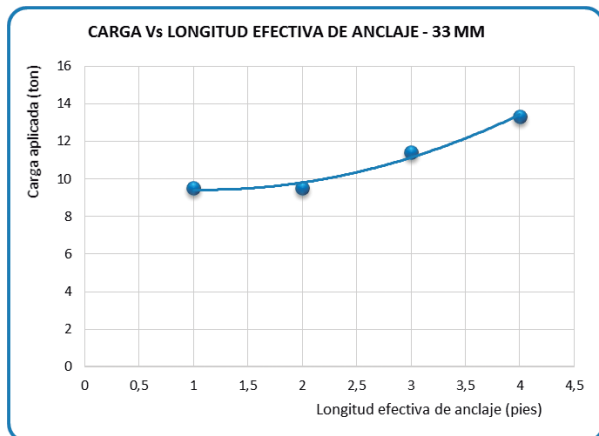


Figura Nº 2. Capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt instalados en tubos simuladores de 33 mm

3.1.2. Resultados de los ensayos en tubos de 36 mm

Durante las pruebas para 1 pie de longitud efectiva de anclaje, no se presentaron situaciones que destacar, es decir, ninguna avería en los pernos ni arandelas; pero a partir de 2 pies, en unos casos los pernos se fisuraron en la cabeza y en otros se produjeron rupturas de la pestaña junto con la arandela, tal como ilustra la Figura Nº 3. En todos los casos, las lecturas de carga se hizo en incrementos de 2 ton, alcanzándose una carga pico de 17 ton (lecturas en el manómetro). En este caso, también la capacidad de anclaje obedece una ecuación cuadrática, como ilustra el Figura Nº 4.

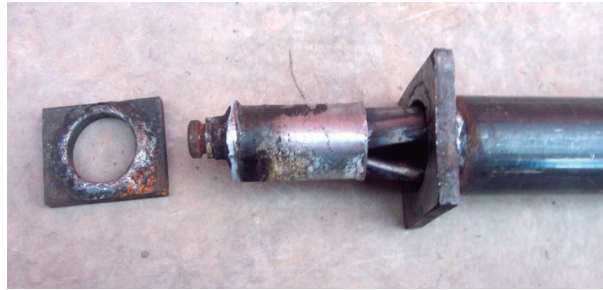


Figura Nº 3. Ruptura de la pestaña del perno en tubo de 36 mm y 3 pies de anclaje.

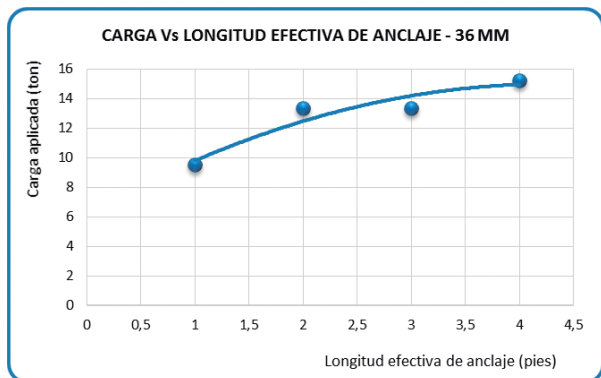


Figura Nº 4. Capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en tubos de 36 mm.

3.1.3. Resultados de los ensayos en tubos de 38 mm

Para 1 y 2 pies de anclaje, los pernos no manifestaron daños, incluso hasta alcanzar la carga pico de 16 ton. Para 3 pies de longitud efectiva de anclaje, la mayoría de los pernos se fisuraron cerca de su cabeza. Para 4 pies de longitud efectiva de anclaje, en la mayoría de los casos, se produjeron rupturas de las pestañas de los pernos junto con la arandela. Para esta longitud se alcanzaron cargas hasta pico de 17 ton (lectura en el manómetro); al igual que en el caso anterior, las lecturas de las cargas se hizo en incrementos de 2 ton. Ajustando las cargas pico registradas de la lectura del manómetro, según la ecuación $Y = 0,9516x$, se obtiene la figura Nº 5.

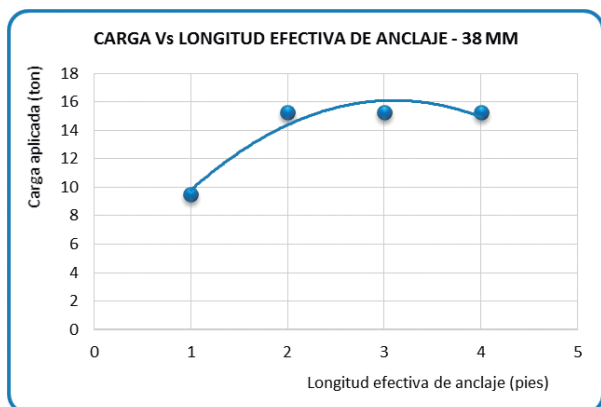


Figura Nº 5. Capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en tubo simulador de 38 mm de diámetro.

3.1.4. Resultados de los ensayos en tubos de 40 mm

En este diámetro de prueba, se observó gran capacidad de anclaje, puesto que desde 1 pie de longitud efectiva de anclaje, se manifestó algún tipo de fallo como fisuramiento cerca de la cabeza del perno durante las pruebas de arranque, tal como ilustra la Figura N° 6. Para 3 y 4 pies de longitud efectiva de anclaje, se presentaron fisuramientos y rupturas de las pestañas de los pernos.

Ajustando las cargas registradas a partir de la lectura en el manómetro, con la ecuación de ajuste según la calibración hecha en la Universidad Nacional de Ingeniería, se obtiene la Figura N° 7. Al igual que en los casos anteriores, la correspondencia de la capacidad de anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje es cuadrática.



Figura N° 6. Fisuramiento del perno cerca de su cabeza en tubo de 40 mm de diámetro y para 1 pie de anclaje.

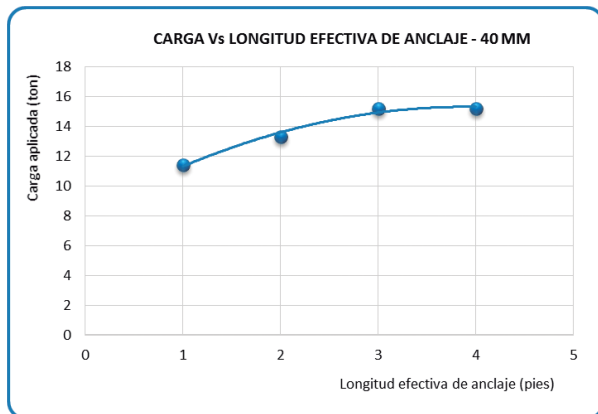


Figura N° 7. Capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en tubo simulador de 40 mm de diámetro.

3.2. Discusión

Con los resultados de las pruebas tratados en el capítulo III, se arriba a las siguientes discusiones de la capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt: la capacidad de anclaje en función de la longitud efectiva de anclaje y el diámetro del tubo simulador. Con esta última discusión, se establece cómo influye el diámetro de los taladros en la capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt.

3.2.1. Capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en función de la longitud efectiva de anclaje

La capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en función de la longitud efectiva de anclaje para diferentes diámetros obedece una ecuación cuadrática. A partir de la Figura N° 8, se derivan las siguientes apreciaciones:

- Cuando se instalan los Hydrabolt en taladros de 33 mm de diámetro, con una longitud efectiva de anclaje de 1 pie, alcanza el mismo valor que para los diámetros de 36 y 38 mm. Para longitudes efectivas de anclaje superiores a 1 pie, se mantiene mucho más bajo que para otros diámetros. Asimismo, a diferencia de diámetros mayores, el comportamiento de la curva no es asintótico.
- La capacidad de anclaje en tubo de 38 mm de diámetro crece vertiginosamente hasta una longitud efectiva de anclaje de 2.5 pies, a partir de cuya longitud tiene un comportamiento pasivo. Alcanza valores más altos que en otros diámetros a partir de 1.5 pies de longitud efectiva de anclaje.
- Los Hydrabolt instalados en taladros de 36 y 40 mm muestran capacidades de anclaje muy uniforme, pero con valores por debajo de lo correspondiente al diámetro de 38 mm. Se tornan asintóticos a partir de 4 pies de longitud efectiva de anclaje.

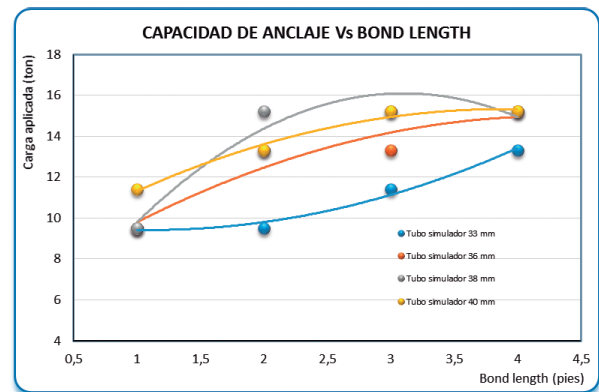


Figura N° 8. Capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en función de la longitud efectiva de anclaje en diferentes diámetros del tubo simulador.

3.2.2. Capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en función del diámetro del tubo simulador

La capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt tiene un comportamiento uniforme y ascendente para 4 y 2 pies de longitud de anclaje, mostrando su mejor actuación en tubos de 38 mm. En general, los pernos Hydrabolt muestran su mejor capacidad de anclaje en tubos de 38 mm, para cualquier longitud efectiva de anclaje, como puede corroborarse en el Figura N° 9. La curva de su capacidad de anclaje para un pie de longitud tiene un comportamiento distinto a los otros casos, dado que la curva resultante no es asintótica.

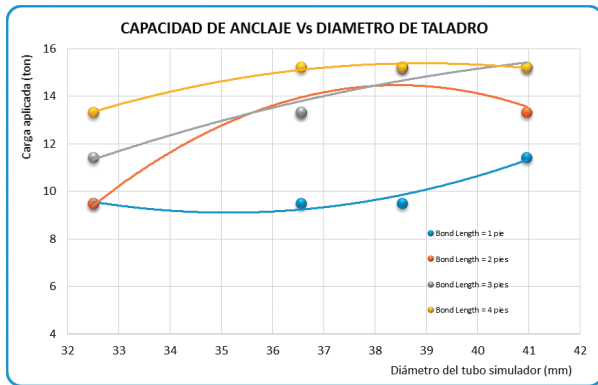


Figura N° 9. Capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en función del diámetro de tubo.

IV. CONCLUSIONES

1. Los pernos Hydrabolt muestran mejor capacidad de anclaje en tubos simuladores de 38 mm.
2. Las curvas de la capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt en tubos de 36, 38 y 40 mm se muestran ascendentes hasta 3 pies de longitud efectiva de anclaje y para longitudes superiores se torna asintóticas para cargas cercanas a 16 ton.
3. De la conclusión 2 se colige que la longitud efectiva de anclaje óptima sería 3 pies. Lo cual implica que instalar pernos con mayores longitudes efectivas de anclaje no sería provechosa, en caso de que una situación real de sostenimiento excediera tal capacidad, lo más conveniente sería jugar con la densidad de pernos.
4. Los pernos Hydrabolt en tubos de 33 mm tiene menor capacidad de anclaje, cuya curva tiene una pendiente muy baja hasta 3 pies de longitud efectiva

de anclaje, a partir de la cual empieza adquirir una pendiente muy pronunciada y no se torna asintótica.

5. Para 2, 3 y 4 pies de longitud efectiva de anclaje, las curvas correspondientes a la capacidad de anclaje de los pernos Hydrabolt tienen un comportamiento ascendente hasta 38 mm de diámetro, a partir del cual se tornan asintóticas. Por consiguiente, el diámetro óptimo de taladro para estos pernos sería 38 mm. Para un pie de longitud efectiva de anclaje, los Hydrabolt tienen un comportamiento distinto, su capacidad de mantiene baja hasta 38 mm, a partir del cual se torna ascendente hasta 11.4 ton para 40 mm.

V. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Cía. New Concept Mining por proporcionar muestras de pernos Hydrabolt y facilidades para su instalación dentro de los tubos simuladores. Asimismo, agradece a sus alumnos de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por su colaboración en la preparación y ejecución de las pruebas de arranque.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Giraldo P., Emiliano M. (2012). Rendimiento de pernos de roca de mayor aplicación en el Perú. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, Vol. 14, N° 28, Julio - Diciembre 2012. pp. 25-40.
- [2] Atlas Copco AB (2003). Rock Reinforcement (2nd. Ed.). Oebro, Sweden: Atlas Copco Rock Drill AB.
- [3] New Concept Mining. Hydrabolt. [En línea] URL < www.ncm.co.za/hydrabolt.html > Consulta 20 de julio de 2015.